

# Analiza mikrostrukture i svojstava ručno kovane mačete

---

Cestar, Andrija

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:314112>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-07**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Andrija Cestar**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Andrija Cestar

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Veri Rede, na utrošenom vremenu i trudu te pruženoj stručnoj pomoći i savjetima tijekom pisanja završnog rada. Također se zahvaljujem asistentici Heleni Lukšić, mag. ing. mech. na pomoći pri ispravljanju rada i tehničkom suradniku Ivanu Vovku na pruženoj pomoći prilikom provedbe eksperimentalnog dijela rada te ostalim djelatnicima Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Najviše se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na podršci, a posebno djedu Ivanu zbog prenesenog znanja te iskustva, bez kojeg ovaj rad ne bi bio moguć.

Andrija Cestar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Andrija Cestar** JMBAG: **0035222459**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza mikrostrukture i svojstava ručno kovane mačete**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of the microstructure and properties of a hand-forged machete**

Opis zadatka:

Kovanje je najstariji postupak obrade metala deformiranjem koji se može provoditi u toplom ili hladnom stanju, a prema obliku tlačnih ploha alata može biti slobodno kovanje ili kovanje u ukovnju. Kovanjem materijala postiže se specifična mikrostruktura, koja za posljedicu ima odgovarajuća mehanička svojstva. U usporedbi s lijevanim materijalom, svojstva kovanog materijala su znatno bolja.

U završnom radu potrebno je provesti karakterizaciju materijala ručno kovane mačete izrađene od čelika nepoznatog sastava. Karakterizacija uključuje analizu kemijskog sastava, kvalitativnu i kvantitativnu analizu mikrostrukture te mjerenje tvrdoće. Također je potrebno detaljno opisati parametre postupka ručnog kovanja (temperatura, vrijeme, sredstvo za hlađenje).

Dobivene rezultate potrebno je analizirati i na temelju toga donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Zadatak zadala: *Rede*  
Prof. dr. sc. Vera Rede

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.  
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.  
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.  
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.  
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Predsjednik Povjerenstva:  
*Branko Bauer*  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK .....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
2. RAZVOJ KOVANJA KROZ POVIJEST .....	2
2.1. Poznata oružja dobivena kovanjem .....	7
2.1.1. Damašćanski mač .....	7
2.1.2. Japanski mačevi .....	9
3. PODJELA KOVANJA .....	15
3.1. Slobodno kovanje .....	16
3.2. Kovanje u ukovnjima .....	17
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	20
4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja .....	20
4.2. Materijal za ispitivanje .....	20
4.3. Postupak ručnog kovanja .....	22
4.4. Zavarivanje drške .....	28
4.5. Brušenje mačete .....	28
4.6. Mikrostrukturalna karakterizacija .....	34
4.7. Ispitivanje mikrotvrdoće .....	45
4.8. Analiza rezultata .....	48
4.8.1. Osvrt na rezultate analize kemijskog sastava .....	48
4.8.2. Osvrt na rezultate analize mikrostrukture .....	48
4.8.3. Osvrt na rezultate mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 .....	50
5. ZAKLJUČAK .....	53
LITERATURA .....	54

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Bakreni štitovi iz Mezopotamije nastali kovanjem [4] .....	2
Slika 2.	Potkova [5].....	3
Slika 3.	Boje čelika pri određenim temperaturama kovanja i popuštanja [6] .....	4
Slika 4.	Kovanje upotrebom nakovnja i čekića [7].....	4
Slika 5.	Mijeh [8] .....	5
Slika 6.	Prikaz kovača i kovačkog mijeha.....	6
Slika 7.	Kovački bat [9].....	6
Slika 8.	Odljevak wootz čelika[10].....	7
Slika 9.	Nož od damašćanskog čelika [11].....	8
Slika 10.	Mikrostruktura damašćanskog mača[10].....	9
Slika 11.	Tachi mač [12] .....	10
Slika 12.	Tanto bodež [13] .....	11
Slika 13.	Tamahagane [13].....	12
Slika 14.	Shingane i kawagane [13].....	13
Slika 15.	Hamon [12] .....	14
Slika 16.	Podjela kovanja [15].....	16
Slika 17.	Struktura materijala uslijed kovanja [14] .....	17
Slika 18.	Oblikovanje otkivka u ukovnju [15] .....	18
Slika 19.	Proizvodi dobiveni kovanjem u ukovnju: a) klipnjača, b) ključevi, c) zupčanici [17] .....	19
Slika 20.	List opruge .....	20
Slika 21.	Oblik i dimenzije uzorka prije kovanja .....	21
Slika 22.	Izrezani uzorak prije kovanja.....	21
Slika 23.	Kovačka vatra .....	23
Slika 24.	TTT dijagram čelika 55Cr3 [19].....	25
Slika 25.	Usijani otkivak prije početka kovanja .....	26
Slika 26.	Otkivak nakon zadnjeg ciklusa grubog kovanja .....	26
Slika 27.	Završno kovanje prednjeg dijela mačete .....	27
Slika 28.	Mačeta nakon kovanja .....	27
Slika 29.	Prikaz zavara na otkivku.....	28
Slika 30.	Mačeta nakon grubog brušenja .....	29
Slika 31.	Površina mačete nakon grubog brušenja .....	29

Slika 32.	Mačeta nakon finog brušenja .....	30
Slika 33.	Površina mačete nakon finog brušenja .....	30
Slika 34.	Poravnanje oštrice mačete na stolnoj brusilici .....	31
Slika 35.	Poravnanje plohe nasuprotne oštrici mačete .....	31
Slika 36.	Oštrica mačete nakon oštrenja turpijom .....	32
Slika 37.	Oštrica mačete nakon završnog oštrenja brusnim papirom .....	32
Slika 38.	Mačeta nakon završene obrade .....	33
Slika 39.	Uzorci za analizu mikrostrukture prije zalijevanja u masu .....	34
Slika 40.	Uređaj za brušenje i poliranje .....	35
Slika 41.	Mikrostruktura osnovnog materijala prije kovanja u poliranom stanju (lijevi rub) snimljena pri povećanju 50× .....	36
Slika 42.	Mikrostruktura osnovnog materijala prije kovanja u poliranom stanju (desni rub) snimljena pri povećanju 50× .....	37
Slika 43.	Mikrostruktura poprečnog presjeka mačete nasuprot oštrici, snimljeno pri povećanju 50× .....	37
Slika 44.	Mikrostruktura poprečnog presjeka mačete u sredini, snimljeno pri povećanju 50× .....	38
Slika 45.	Mikrostruktura poprečnog presjeka oštrice mačete, snimljeno pri povećanju 50× .....	39
Slika 46.	Mikrostruktura osnovnog materijala prije kovanja u nagriženom stanju, snimljeno pri povećanju 50× .....	40
Slika 47.	Mikrostruktura osnovnog materijala u sredini presjeka prije kovanja, snimljeno pri povećanju 200× .....	41
Slika 48.	Mikrostruktura osnovnog materijala u sredini presjeka prije kovanja, snimljeno pri povećanju 1000× .....	41
Slika 49.	Mikrostruktura poprečnog presjeka mačete sastrane nasuprot oštrici, snimljeno pri povećanju 500× .....	42
Slika 50.	Mikrostruktura poprečnog presjeka mačete sa strane nasuprot oštrici, snimljeno pri povećanju 1000× .....	43
Slika 51.	Mikrostruktura mačete u sredini poprečnog presjeka, snimljeno pri povećanju 500× .....	43
Slika 52.	Mikrostruktura mačete u sredini poprečnog presjeka, snimljeno pri povećanju 1000× .....	44



---

Slika 53.	Mikrostruktura u oštrici mačete, snimljena pri povećanju 500× .....	44
Slika 54.	Mikrotvrdomjer PMT3 .....	46
Slika 55.	Pozicije mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 .....	46
Slika 56.	Mikrostruktura gašenog čelika 55Cr3 za brzinu gašenja od 10 °C/s [20] .....	49
Slika 57.	Mikrostruktura gašenog čelika 55Cr3 za brzinu gašenja od 1 °C/s [20] .....	50
Slika 58.	Mikrotvrdoća HV0,2 u osnovnom materijalu .....	50
Slika 59.	Mikrotvrdoća HV0,2 za tupi dio mačete .....	51
Slika 60.	Mikrotvrdoća HV0,2 u sredini poprečnog presjeka mačete .....	51
Slika 61.	Mikrotvrdoća HV0,2 pri oštrici mačete .....	52

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Kemijski sastav analiziranog čelika .....	22
Tablica 2. Prikaz temperatura i vremena tijekom kovanja .....	24
Tablica 3. Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 osnovnog materijala prije kovanja .....	47
Tablica 4. Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 poprečnog presjeka uz tupi dio mačete .....	47
Tablica 5. Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 u sredini poprečnog presjeka mačete .....	48
Tablica 6. Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 u poprečnom presjeku pri oštrici mačete.....	48

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A_{cm}$	-	Granica pretvorbe između područja austenita i austenita+karbida
$F$	N	sila
$Fe_3C^{id}$	-	eutektoidni cementit
HV	-	mikrotvrdoća po Vickersu
K	-	karbid
$R_{p0,2}$	MPa	konvencionalna granica razvlačenja
$\alpha^{id}$	-	eutektoidni ferit

## SAŽETAK

U završnom radu provedena je karakterizacija materijala ručno kovane mačete koja je uključivala analizu kemijskog sastava, kvalitativnu i kvantitativnu analizu mikrostrukture te mjerenje mikrotvrdoće.

U teorijskom dijelu rada opisana je povijest kovanja te neka od najpoznatijih oružja dobivenih kovanjem, kao i podjela postupaka kovanja.

U eksperimentalnom dijelu rada detaljno su opisani parametri postupka ručnog kovanja mačete za koju je utvrđeno da je izrađena od čelika oznake 55Cr3. U poprečnom presjeku mačete mikrostruktura se sastoji od bainita i martenzita, a u području oštrice uočena je i mala količina sitnih karbida po granicama kristalnih zrna. Omjer između volumnog udjela martenzita i bainita nije isti na svim dijelovima poprečnog presjeka mačete. Razlike u mikrostrukturi i stupnju ugnječanja odrazile su se na vrijednosti mikrotvrdoće. Najviše vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene su u oštrici mačete (460 – 524 HV<sub>0,2</sub>). Nešto niže vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene su u tupom dijelu mačete, a najniže vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene su u sredini mačete.

Ključne riječi: karakterizacija, mikrostruktura, mikrotvrdoća, kovanje

## SUMMARY

In the thesis, the characterization of the material of the hand-forged machete was carried out. The characterization included analysis of the chemical composition, qualitative and quantitative analysis of the microstructure, and measurement of microhardness.

The theoretical part of the thesis describes the history of forging and some of the most famous weapons made by forging, as well as the distribution of forging processes.

In the experimental part of the thesis, the parameters of the hand-forging process of the machete, which was determined to be made of steel grade 55Cr3, are described in detail. In the cross-section of the machete, the microstructure consists of bainite and martensite. In the area of the blade, a small amount of little carbides was observed at the crystal grain boundaries. The ratio between the volume fraction of martensite and bainite is not the same in all parts of the machete's cross-section. The differences in the microstructure and degree of deformation were reflected in the microhardness values. The highest microhardness values were measured in the machete's blade (460 – 524 HV0.2). Slightly lower microhardness values were measured in the blunt part of the machete and the smallest microhardness values were measured in the middle of the machete.

Key words: characterization, microstructure, microhardness, forging

## 1. UVOD

Slobodno kovanje je postupak oblikovanja metala, koje je u današnjem dobu zapostavljeno. Više se upotrebljavaju kompleksniji alati, što je više povezano sa kovanjem u ukovnjima. Kovači su u prošlosti bili majstori u izrađivanju različitih vrsta oružja, alata i ostalih predmeta. Kolijevke kovanja su bile Mezopotamija i Egipat. Prvo se kovao bakar, sve dok nije došlo željezno doba te su pojavom željezne rude, kovači radili sa željezom i željeznim legurama kao i dan-danas [1].

Čelik kao materijal je izrazito zastupljen u kovanju. To je metastabilno kristalizirana Fe-C legura koja sadrži do 2,03 % ugljika. Čelici se dijele na podeutektoidne, eutektoidne i nadeutektoidne. Podeutektoidni čelici se primjenjuju kao konstrukcijski dok se eutektoidni i nadeutektoidni primjenjuju kao alatni čelici. Čelik se kod kovanja zagrijava i toplo oblikuje, gdje se tada mijenja mikrostruktura. Promjena mikrostrukture promatra se u TTT-dijagramu (Temperature-Time-Transformation), gdje se putem određene temperature, vremena i brzine hlađenja određuju faze u mikrostrukturi čelika [2].

Izrada različitih proizvoda poput mačeta i noževa, koji služe za svakodnevnu upotrebu je visoko zastupljena. Katane se koriste i danas, ali dosta rjeđe nego prije. Katana je bila mač iznimno dobrih svojstava. Izrađivala se od čelika *tamahagane*. Unutrašnjost katane je činila jezgra nazvana *shingane*, koja je bila vrlo žilava i duktilna te mogla podnositi udarce i vibracije. Vanjski dio se nazivao *kawagane* i osigurao je da mač bude čvrst i tvrd te da ima obnovljivu oštricu koja bi se u borbama zatupila i ne bi bila funkcionalna [3].

## 2. RAZVOJ KOVANJA KROZ POVIJEST

Kovanje je tehnika obrade metala gdje se pomoću topline i sile udaraca deformira određeni komad. Može se obavljati u toplom ili hladnom stanju. Kolijevke kovanja su bile Egipat i Mezopotamija, država koja je postojala između rijeka Eufrata i Tigrisa na današnjem području Iraka. Navodi se da je kovanje nastalo 4500 godina pr. Kr. U to vrijeme se kovao bakar jer ljudi još nisu otkrili ostale metale. Primarni cilj kovanja u to vrijeme je bio izrada ručnih alata i oružja za preživljavanje. Slika 1. prikazuje bakrene štitove iz Mezopotamije nastale kovanjem. Kovanje je imalo važnu ulogu u razvoju prvih civilizacija. Kovači su izrađivali mačeve, koplja, štitove, šljemove te razna druga oružja, koja su bila potrebna u ratovima. Kovači su izrađivali i različite alate te druge uporabne predmete koji su se koristili u svakodnevnom životu. Također su kovali i novac [1].



**Slika 1. Bakreni štitovi iz Mezopotamije nastali kovanjem [4]**

Kovači su bili vrlo cijenjeni i u ne tako davnoj prošlosti jer su izrađivali različita oruđa i alate koji su se koristili u poljodjelstvu. Najčešći poslovi koje su kovači obavljali bili su popravak

plugova te popravak lemeša, oštrenje motika i kosa, izrada noževa za rezanje sijena te kovanje ukrasnih ograda. Jedan od izazovnijih poslova za kovače bio je potkivanje konja i okivanje kola. Kovači su sami izrađivali potkove, zatim bi se konju očistilo kopito pomoću turpije, a nakon toga se potkova čavlima pričvršćivala uz konjsko kopito. Potkivanjem konja sprječavalo se pretjerano trošenje kopita.

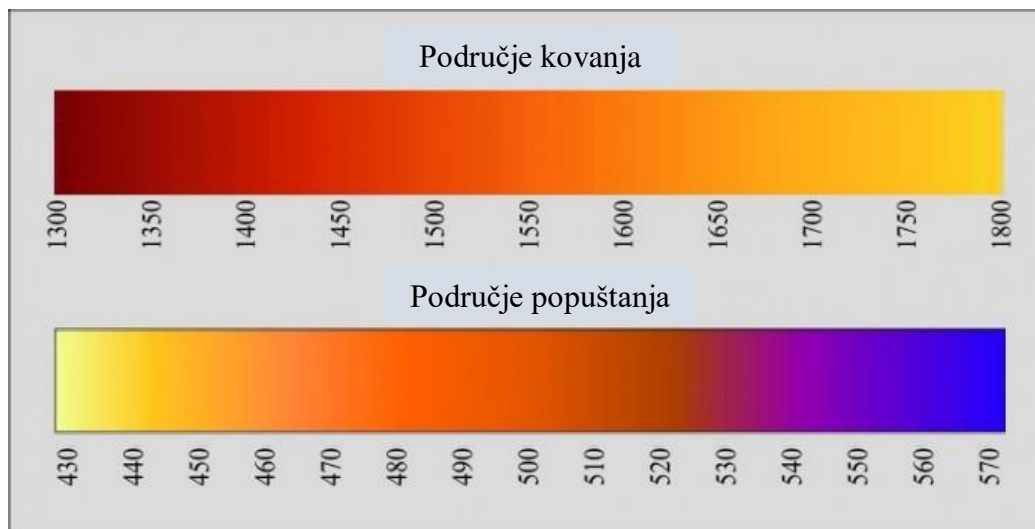
Na slici 2. vidi se potkova dobivena ručnim kovanjem.



**Slika 2. Potkova [5]**

Kovački zanat se s vremenom razvijao, a od industrijske revolucije do danas je znatno napredovao. Svaki kovač je morao proći dugotrajnu edukaciju da bi postao dobar majstor. Šegrti su uglavnom bili prisutni u kovačnici, te pomagali i gledali kovača kako radi s vatrom i metalom. Glavna pomagala kovača bila su čekić, nakovanj te ognjište. Pri povišenim i visokim temperatura, materijal je postajao sve više oblikovljiv. Kovači u prošlosti nisu imali nikakve vrste termometara da bi znali na kojoj temperaturi je čelik spreman za kovanje ili kaljenje. Jedini način da se prepozna trenutak početka kovanja bila je boja čelika ili nekog drugog metala. Na slici 3. vidi se raspored temperatura i boja čelika kod kovanja i popuštanja [6].





**Slika 3. Boje čelika pri određenim temperaturama kovanja i popuštanja [6]**

Nakovnji su bili vrlo teški predmeti, uglavnom postavljeni na drveni trupac (panj), otporni na visoke i povišene temperature te na udarna opterećenja. Čekića je bilo raznih vrsta, od lakših prema težima. Kovač je ručnom silom preko čekića djelovao na vrući metal i udaranjem postizao željeni oblik.

Slika 4. prikazuje postupak kovanja upotrebom nakovnja i čekića.



**Slika 4. Kovanje upotrebom nakovnja i čekića [7]**

Ako je trebalo kaliti čelične predmete nakon kovanja, kod nakovnja se nalazila velika kamena posuda gdje je stajala voda. Uranjanjem u vodu, čelik bi se zbog nadkritičnog ohlađivanja zakalio.

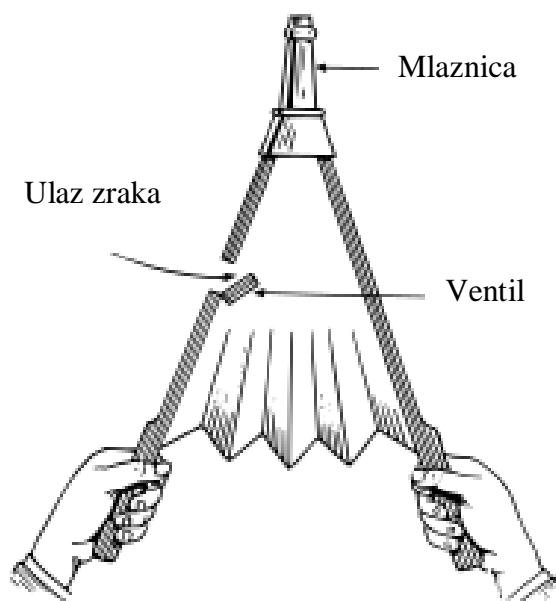
Da bi se metalni komadi zagrijali na dovoljno visoku temperaturu u svakoj kovačkoj radionici nalazilo se ognjište. Kako bi se osigurala što viša temperatura vatri se trebao dodatno dobavljati kisik. Za to su u prošlosti služili mjevovi, a kasnije i ventilatori koji su dodatno upuhivali zrak. Mijeh je sadržavao dvije ručke spojene sa životinjskom kožom, imao je ventil kroz koji je ulazio zrak, a pomoću mlaznice se zrak ispuhivao u vatru.

Slika 5. prikazuje ručni mijeh dok se na slici 6. vidi prikaz kovača i kovačkog mijeha.

Kovački mijeh se pokretao preko nožne papučice koja je polugom bila povezana s mijehom. Nožnim pokretima, mijeh je usisavao zrak i ispuhivao ga u ognjište.

U današnje doba, kako je tehnologija napredovala, razvili su se kovačke preše i batovi koji rade na principu hidraulike. Što se tiče ognjišta, danas su ga zamijenile peći sa zaštitnom atmosferom. Obični čekić se vrlo malo koristi i može se reći kako tradicionalno kovanje polako izumire.

Na slici 7. prikazan je suvremeni kovački bat.



Slika 5. Mijeh [8]



**Slika 6. Prikaz kovača i kovačkog mijeha**



**Slika 7. Kovački bat [9]**

## 2.1. Poznata oružja dobivena kovanjem

### 2.1.1. Damašćanski mač

Damašćanski mač je jedan od najpoznatijih mačeva, a datira još iz vremena vladavine Aleksandra Makedonskog. Proizvodili su ga u Damasku od čelika kojeg su arapski trgovci uvozili iz Indije. Kroz cijeli srednji vijek ovaj damašćanski čelik bio je jedan od najboljih materijala za izradu oružja. Postoje dva načina izrade damašćanskog mača. Prva izrada je sa originalnim *wootz-om*, čelikom visoke čvrstoće, čiji je način kovanja izgubljen u vremenu [10]. Na slici 8. vidi se odljevak *wootz* čelika.



Slika 8. Odljevak wootz čelika[10]

Drugi način koji se i dan-danas koristi je „zavarivanjem slojeva“ čelika. Proces je izgledao tako da bi se uzele pločice određenog čelika i pri visokim temperaturama kovale i spontano zavarile. Tada bi se materijal presavio i opet bi se ponovio postupak da bi se dobilo više slojeva. Tijekom ere damašćanskog čelika, proizvodile su se tvrde legure sa sadržajem ugljika od oko 2 % ili legure koje su bile mekane i žilave, s oko 0,5 % ugljika. Idealan čelik za kvalitetne mačeve trebao bi biti istodobno žilav i tvrd što se vrlo teško postiže i predstavljalo je veliki problem za

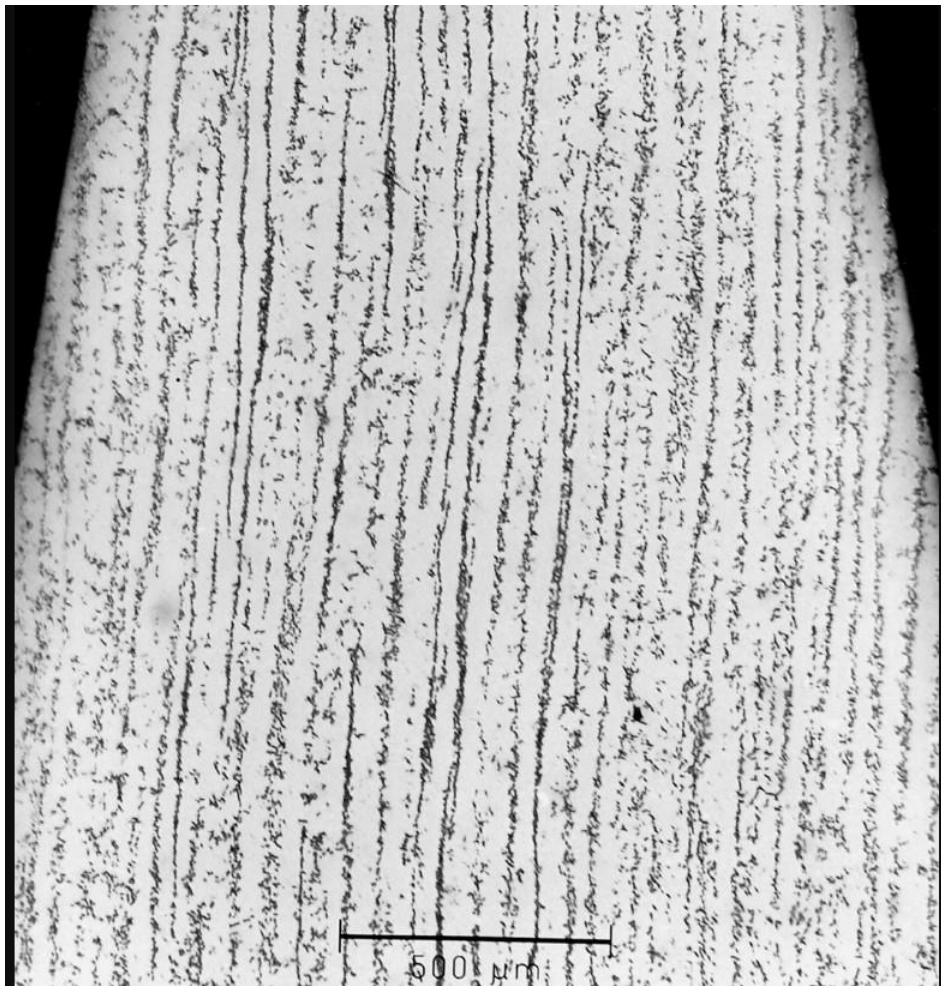
kovače mačeva. Žilavost je bila bitna kako se mač ne bi slomio pri udarcima kojima je bio izložen u borbi. Mikrostruktura damašćanskog mača sastojala se je od heterogeno distribuiranih sekundarnih karbida u perlitnoj matrici. Ugljik sa željezom formira željezne karbide koji su relativno otporni na koroziju za razliku od perlitne matrice. U strukturi damašćanskog čelika bili su prisutni i uključci manganovog sulfida (MnS). Uključci imaju karakterističan oblik zbog visokog stupnja ugnječanja pri kovanju. Zbog visokouglične oštrice i niskouglične jezgre, mač je bio spoj žilave jezgre te tvrde oštrice otporne na trošenje. Oštrica je bila visoke tvrdoće i čvrstoće jer su se tijekom toplinske obrade karbidi formirali u zrna koja se mogu vidjeti na površini svakog damašćanskog mača [10].

Slika 9. prikazuje oštricu noža od damašćanskog čelika gdje se na površini oštrice jasno vidi tipičan uzorak koji je posljedica posebne strukture ovog čelika.



**Slika 9. Nož od damašćanskog čelika [11]**

Na slici 10. prikazana je mikrostruktura damašćanskog čelika koja se sastoji od perlitne matrice (svijetli kristali) i sekundarnih karbida (tamna zrna).

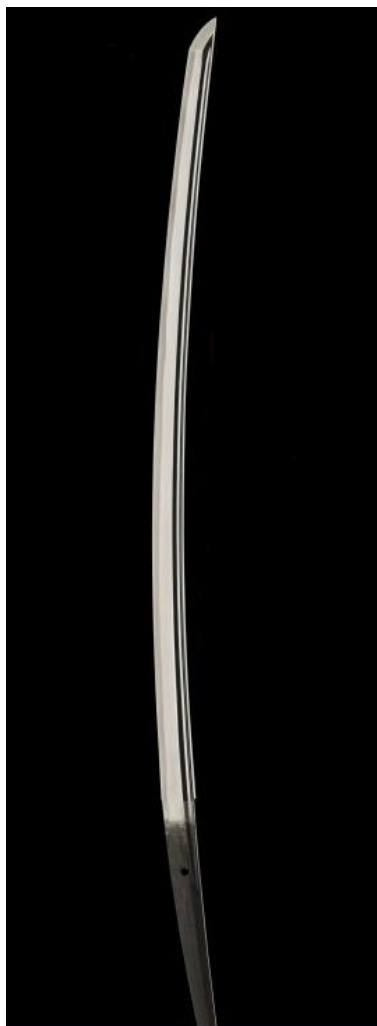


Slika 10. Mikrostruktura damaščanskog mača [10]

### 2.1.2. Japanski mačevi

Japanske mačeve ili katane koristili su drevni samuraji u Japanu. To su dugački zakrivljeni mačevi iznimno dobrih svojstava. Njihova osnovna odlika je jako dobra duktilnost i vrlo visoka žilavost u jezgri uz istodobno visoku tvrdoću i čvrstoću oštrice. Ovakva kombinacija svojstava postizala se složenim metalurškim procesima i procesima toplinske obrade, a katane se smatraju remek dijelom među sličnim oružjem. Katane su oružje kojim se lako rukovalo i primarni zahtjev im je bio da mač bude više koristan za sječenje nego za ubadanje neprijatelja. Razvoj japanskih mačeva započeo je proizvodnjom dugih, zakrivljenih mačeva s vitkim vrhom poznatijih pod nazivom *tachi*, koji su se pojavili tijekom razdoblja Heian (794. – 1185.) i prethodili su katanama. Pretpostavlja se da su Japanci napravili ove mačeve po uzoru na neke kineske [3].

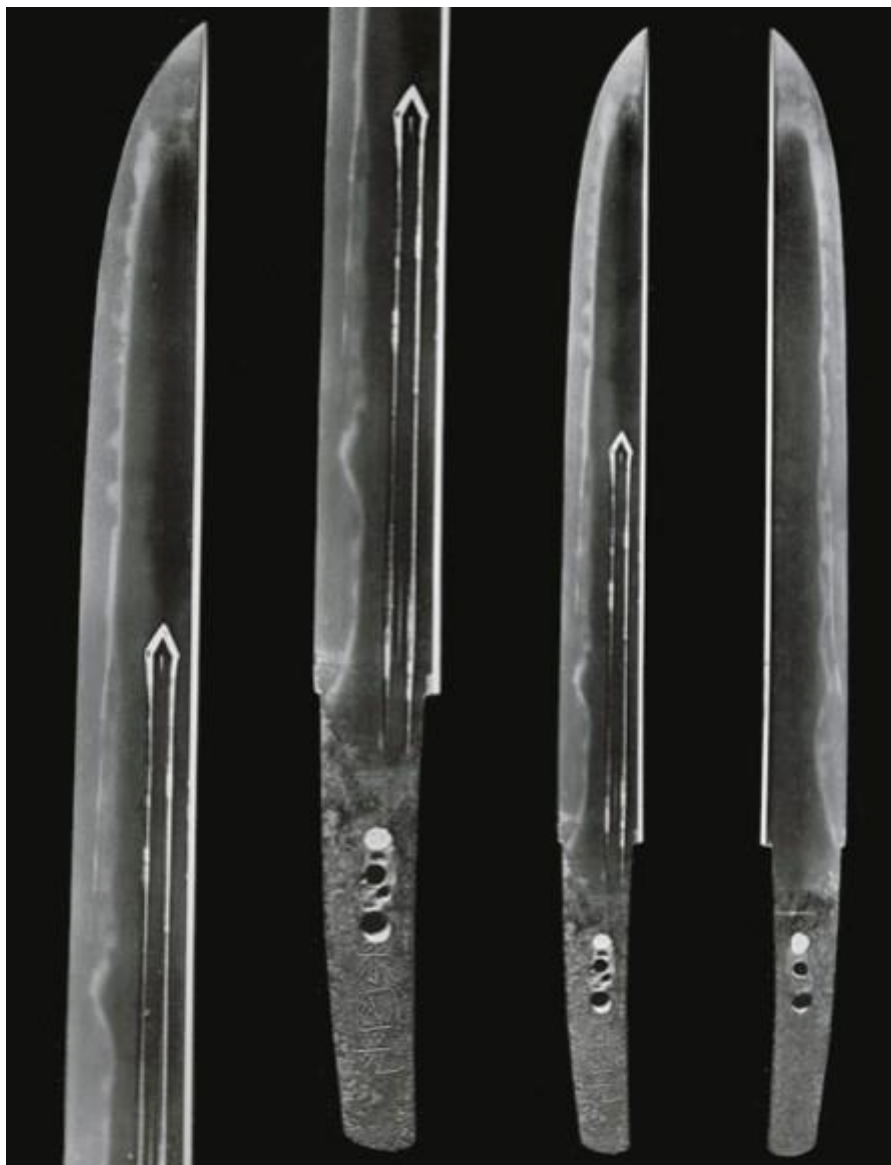
Slika 11. prikazuje *tachi* mač.



**Slika 11. Tachi mač [12]**

Tijekom ratovanja Japanaca s Mongolima oko 1200. godine pojavili su se prvi problemi s tada aktualnim *tachi* mačem. Mačevi su često pucali pod silinom udaraca, zbog nedovoljno žilave strukture. Problem je bio previsoki udio ugljika u čeliku što je rezultiralo smanjenom žilavošću materijala. Drugi problem je bio dizajn mačeva, odnosno njihova duljina koja je iznosila između 61 i 76 centimetara. Ovakvo oružje nije se pokazalo praktičnim na malim prostorima na bojištu. Zbog toga se počelo izrađivati novo oružje pod nazivom *tanto*. *Tanto* je bio maleni bodež koji je služio upravo za borbe na malim prostorima. Krajem 19. stoljeća, *tanto* je zamijenjen *wakazashi* bodežom koji je imao sličan dizajn i koji je služio za istu namjenu [3].

Na slici 12. vidi se *tanto* bodež.



Slika 12. Tanto bodež [13]

Čelik od kojeg se izrađivala katana, dobivao se u glinenim pećima pod nazivom *tataru*. Kao polazna sirovina koristio se pijesak u čijem je sastavu bio visoki udio željeza, poznat pod nazivom *satetsu*. Pijesak se ubacio u *tataru* gdje se uz prisustvo drvenog ugljena grijao na temperaturama između 1200 i 1500 °C. Kada bi se pijesak na visokim temperaturama rastalio, većina nečistoća iz rastaljenog metala bi isplivala u obliku troske na površinu te se lako mogla odstraniti. Nakon hlađenja dobiveni čelik bio je izrezan na više dijelova i razvrstan po kvaliteti i udjelu ugljika. Visokokvalitetni *tamahagane* se bitno razlikovao od metala niže kvalitete, a mogao se prepoznati po visokoj gustoći, sa sjajnom srebrnom bojom i finom kristalnom strukturom. Udio ugljika je varirao između 1,0 i 1,2 % [3].

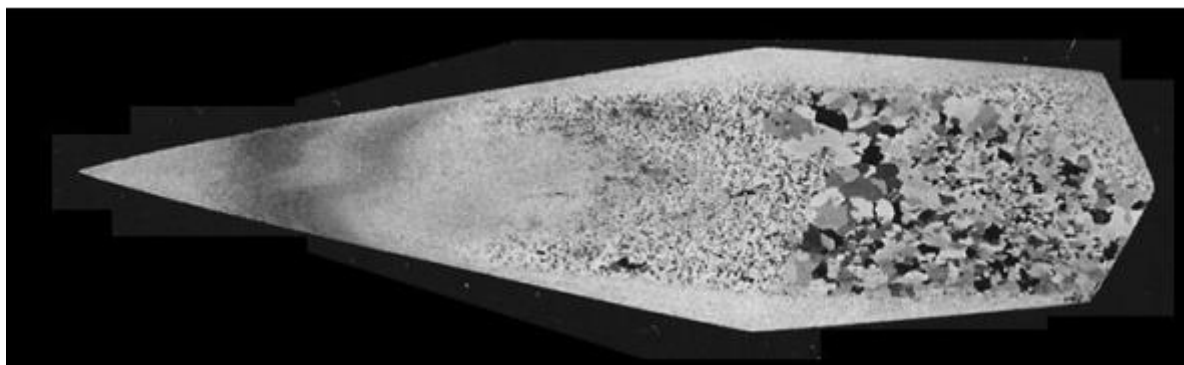


Slika 13. prikazuje *tamahagane* čelik.



**Slika 13. Tamahagane [13]**

Poprečni presjek katane sačinjavali su dijelovi pod nazivima: *kawagane* i *shingane*. *Kawagane* je predstavljao tvrdi dio s većim udjelom ugljika, dok je *shingane* predstavljao mekani dio odnosno žilaviji s manjim postotkom ugljika. *Kawagane* je iskovan takozvanim spajanjem slojeva čelika koji se grijao i savijao par puta da se dobije slojevita struktura, vrlo slična strukturi damašćanskih mačeva. Udio ugljika kod završnog kovanja je iznosio oko 0,7 % i taj dio je rezultirao relativno visokom tvrdoćom. *Shingane* je dobiven na dosta sličan način i ubačen u džep *kawaganea* kao što je prikazano na slici 14. On je bio jezgra katane i sadržavao je oko 0,3 % ugljika. Svojom žilavošću i duktilnošću, jezgra je amortizirala udarce i vibracije kojima je katana bila izložena i na taj način ju je čuvala od pucanja [3].



Slika 14. Shingane i kawagane [13]

Najvažniji dio mačete bio je *hamon* odnosno oštrica. Za svojstva oštrice najvažniji je bio postupak kaljenja katane. Postupkom kaljenja trebalo je postići martenzitnu mikrostrukturu kako bi oštrica bila tvrda. Također je bilo važno da se *hamon* može lako naoštriti. Kako bi se spriječilo kaljenje kompletne mačete i zakalila samo oštrica, na dio katane koji je trebao ostati žilav nanosio se premaz koji je onemogućavao nadkrično hlađenje tog dijela pri gašenju u vodi. Tako se martenzitna mikrostruktura postizala samo na *hamonu* dok je ostali dio katane imao perlitnu mikrostrukturu upravo zbog sporog ohlađivanja, što je rezultiralo žilavijim materijalom otpornim na lom. Zaštitni sloj zvao se *tuchi-dori*, a dobivao se miješanjem praha drvenog ugljena, gline, pješčenjaka i vode [3].

Na slici 15. vidi se prikaz *hamona* te linija kaljenja koja dijeli oštricu od ostatka katane.



Slika 15. Hamon [12]

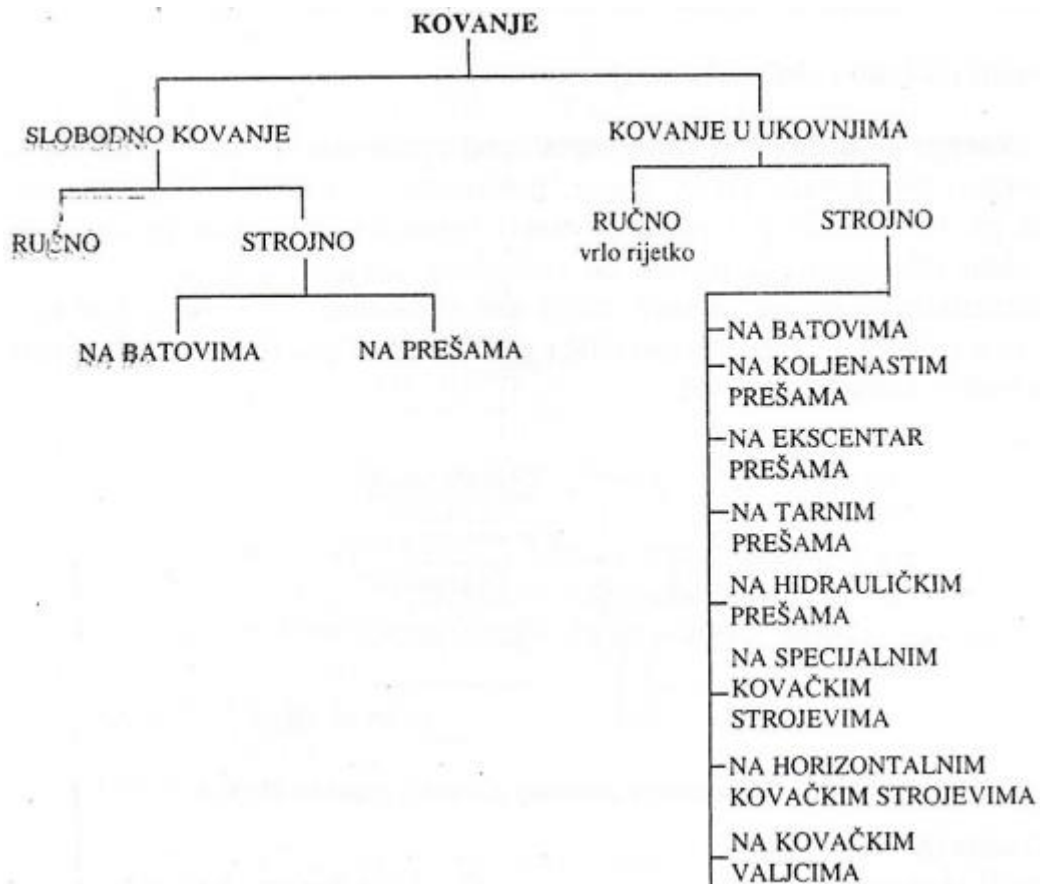
### 3. PODJELA KOVANJA

Kovanje se može podijeliti na 2 postupka, a to su tradicionalno ili slobodno kovanje te kovanje u ukovnjima. To je postupak oblikovanja materijala korištenjem lokaliziranih tlačnih sila. Postoji hladno kovanje i toplo kovanje. Kod toplog kovanja se materijal deformira pri visokim i povišenim temperaturama. Otkivci nakon završnog kovanja idu većinom na daljnju obradu [14].

Poznati izraz kod kovanja je i kovačko zavarivanje, a to je postupak kojim se krajevi dva dijela koji se trebaju spojiti, zagriju u kovačkoj vatri do usijanja. Zatim se čekićanjem istiskuju određene nečistoće poput oksida i troske, kako bi se dodirne površine spojile uslijed djelovanja međuatomskih sila dvaju dijelova. Primjer takvog postupka je današnja proizvodnja damašćanskog čelika [14].

Kod kovanja dolazi i do pojave grešaka koje mogu kasnije uzrokovati pukotine. Zrna određenog materijala se kod postupka kovanja izdužuju u smjeru tečenja materijala, a uključci (oksidi) se uglavnom nalaze na granicama zrna i prate njihovo kretanje. Izduživanjem zrna dolazi do anizotropije (svojstva poprimaju različite vrijednosti u različitim smjerovima u materijalu). Pojavu pukotine može uzrokovati i hlađenje otkivka nakon procesa kovanja. Čelik može nakon hlađenja (pogotovo nadkritičnog) postati tvrd, ali i veoma krhak što može uzrokovati krhki lom materijala, gdje ne postoji tečenje materijala u plastičnom području već instantni lom [14].

Na slika 16. vidi se shema podjele kovanja.



Slika 16. Podjela kovanja [15]

### 3.1. Slobodno kovanje

Slobodno kovanje je najstariji postupak oblikovanja kod kojeg se ne koriste ukovanj i posebni alati, već jednostavni alati poput čekića i nakovnja. Kod deformacijskog postupka, tečenje materijala se odvija slobodno kako i sami naziv kaže, odnosno okomito na smjer djelovanja tlačne sile kovanja. Slobodno kovanje se koristi u maloserijskoj proizvodnji. U slučajevima slobodnog kovanja sirovac se najčešće nalazi u valjanom stanju i ima usmjerenu strukturu. Može biti kružnog ili kvadratnog poprečnog presjeka relativno malih dimenzija i male mase. Metal se većinom kuje u toplom stanju, jer mu svojstva poput oblikovljivosti i deformabilnosti rastu, a krutost se smanjuje [16].

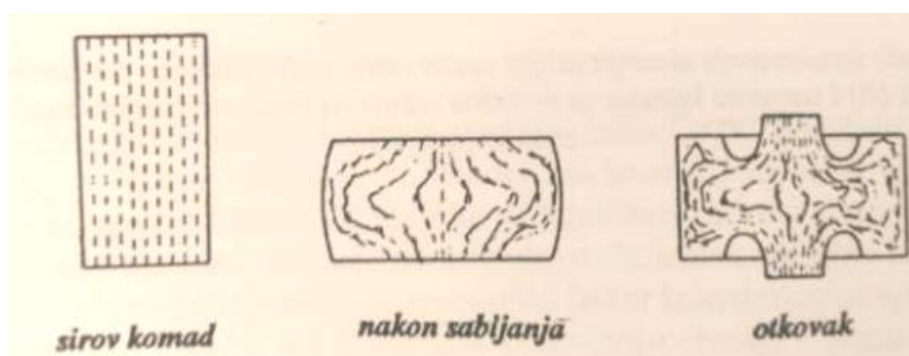
Značajke slobodnog kovanja u odnosu na druge postupke oblikovanja metala:

- Slobodno kovanje je u maloserijskoj proizvodnji ekonomično (mali troškovi)
- Deformacijske odnosno tlačne sile kod kovanja su relativno male, zbog velikog broja udaraca koje otkivak može podnijeti
- Značajno poboljšavanje svojstava materijala (tvrdoća, čvrstoća)

- Izrada proizvoda velikih dimenzija visoke kvalitete
- Potreba za velikim dodacima za naknadnu obradu te propisivanje širokog polja tolerancija dimenzija koje je uvjetovano tehnološkim mogućnostima slobodnog kovanja [16].

Kod kovanja imamo veliku potrošnju toplinske energije zbog grijanja metala i naknadne toplinske obrade. Velika potrošnja energije prisutna je pogotovo kod otkivaka velikih dimenzija i masa kojima je potreban puno veći unos topline za postizanje određene temperature kovanja što dovodi do velikih troškova i neekonomičnosti [16].

Slika 17. prikazuje strukturu materijala uslijed kovanja.



Slika 17. Struktura materijala uslijed kovanja [14]

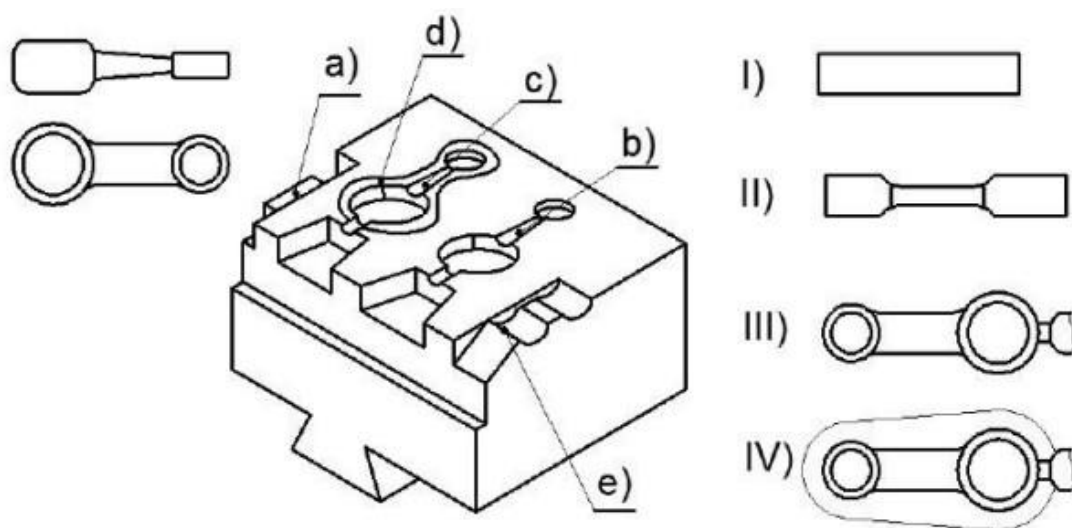
### 3.2. Kovanje u ukovnjima

Kovanje u ukovnjima razlikuje se od slobodnog kovanja. Kod kovanja u ukovnjima proces oblikovanja mase metala događa se u unutarnjoj šupljini (gravuri) alata pa je tečenje metala kod deformacijskog postupka točno određeno stjenkama gravure. Metal pod djelovanjem udaraca malja na kovačkom batu ili pod pritiskom kovačke preše mijenja oblik i ispunjava gravuru ukovnja. Za razliku od maloserijske proizvodnje kod slobodnog kovanja, kovanje u ukovnjima prikladno je za suvremenu masovnu i velikoserijsku proizvodnju. Ovim postupkom postiže se puno bolja kvaliteta izratka te ujednačene dimenzije i oblici [17].

Ukovnji mogu biti otvorenog ili zatvorenog tipa. Puno češće se koriste ukovnji otvorenog tipa. Sirovci za obradu u ukovnju mogu biti četvrtastog, okruglog ili pločastog oblika. Neki od primjera proizvoda koji se dobivaju kovanjem u ukovnjima su: ključevi, zupčanici, koljenasta vratila, klipnjače te turbinske lopatice [17].

Ukovnji su izloženi mehaničkim naprezanjima i trošenju. Pojavljuje se kratkotrajno udarno opterećenje pri povišenim temperaturama. Također se javlja cikličko tlačno opterećenje što izaziva pojavu umora materijala, odnosno pojavu inicijalne pukotine i njezino postupno širenje kod dinamičkog opterećenja. Prisutni su i mehanizmi kemijskog i tribološkog trošenja poput oksidacije, adhezije te abrazije. Zbog visokih temperatura i toplinskih naprezanja pojavljuje se i toplinski umor. Zbog toga kod konstruiranja ukovnja treba zadovoljiti određena svojstva poput otpornosti na trošenje i oksidaciju, otpornosti na popuštanje i temperaturne šokove te visoku žilavost uz visoku tlačnu konvencionalnu granicu razvlačenja  $R_{p0,2}$  [18].

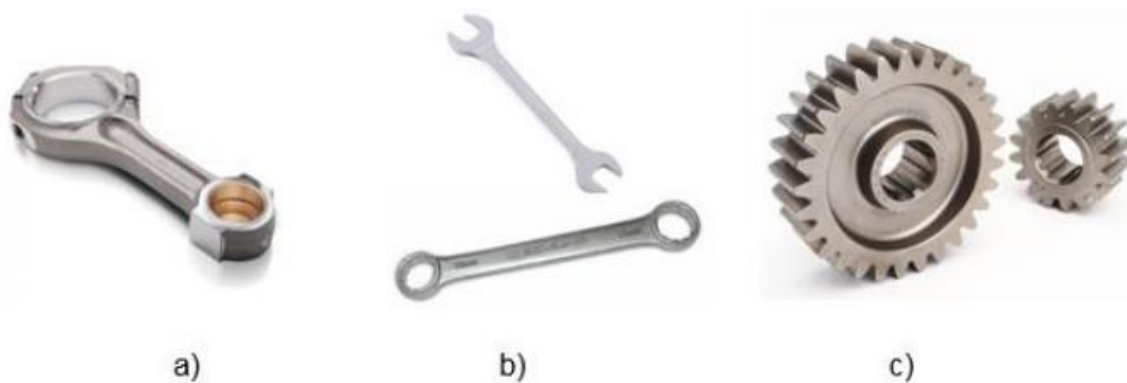
Na slici 18. prikazan je postupak oblikovanja otkivka u ukovnju



Slika 18. Oblikovanje otkivka u ukovnju [15]

Početni oblik sirovca (I) je šipka okrugloga poprečnog presjeka i volumena malo većeg od volumena gotovog otkivka. Kovanje se provodi na kovačkom batu. U gravuri za izduživanje (a), šipka poprima oblik (II), a oblik (III) poprima u gravuri za uvaljivanje oblika (b). U završnoj gravuri (c), otkivak poprima oblik (IV), gdje se vidi višak materijala koji ga okružuje u vidu srha. Višak materijala je tekao putem kanala (d). Za odstranjivanje srha služio je nož za odsijecanje (e) [15].

Na slici 19. prikazani su a) klipnjača, b) ključevi i c) zupčanici dobiveni kovanjem u ukovnjima.



**Slika 19. Proizvodi dobiveni kovanjem u ukovnju: a) klipnjača, b) ključevi, c) zupčanici [17]**



## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

### 4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

Primarni cilj rada je karakterizacija materijala ručno kovane mačete izrađene od čelika nepoznatog sastava. Također će se detaljno opisati parametri postupka kod ručnog kovanja (temperatura, vrijeme te sredstvo za hlađenje).

Karakterizaciju materijala će obuhvaćati:

- analiza kemijskog sastava
- kvalitativna i kvantitativna analiza mikrostrukture
- mjerenje mikrotvrdoće HV0,2.

### 4.2. Materijal za ispitivanje

Kao početni materijal za izradu mačete uzeta je istrošena lisnata opruga, stara 50-ak godina, nepoznatog proizvođača. Dimenzije lista opruge bile su  $890 \times 60 \times 7$  mm.

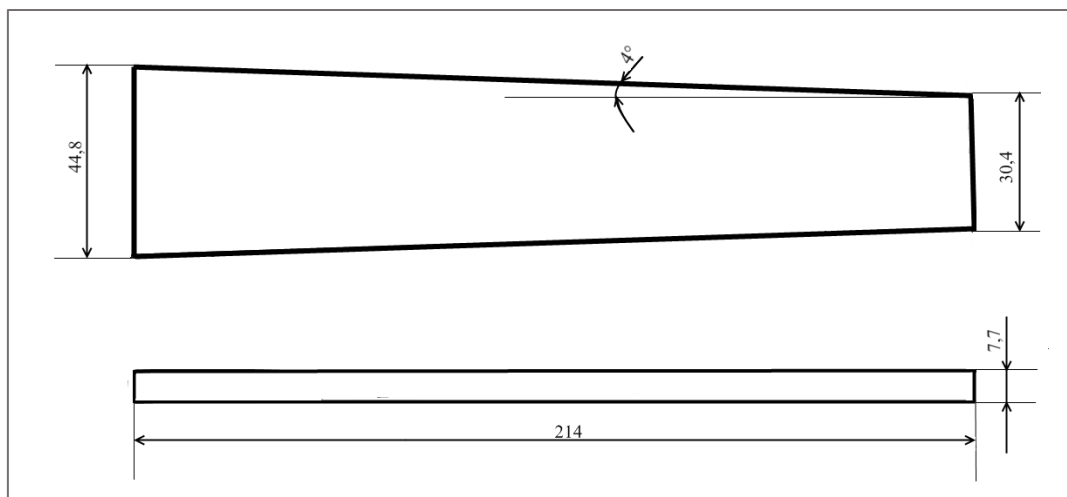
Na slici 20. prikazan je list opruge.



Slika 20. List opruge

Iz početnog oblika ručnom brusilicom izrezan je uzorak čiji su oblik i dimenzije prikazani na slici 21., iz kojeg je kovanjem izrađena mačeta.

Na slici 22. vidi se izrezani uzorak prije kovanja.



Slika 21. Oblik i dimenzije uzorka prije kovanja



Slika 22. Izrezani uzorak prije kovanja

Kovanje je provedeno na temperaturama između 1032 i 533 °C zbog čega bi se ova obrada mogla svrstati u termo-mehaničku obradu. Nakon kovanja je na otkivak navaren dio koji se uglavljuje u držak, a zatim je oštrica mačete brušena.

Iz početnog oblika izrezan je komadić materijala dimenzija 15 × 15 × 7 mm, na kojem je analiziran kemijski sastav i provedena analiza mikrostrukture u početnom stanju.

Analiza kemijskog sastava provedena je u Laboratoriju za analizu metala, na zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Kemijski sastav materijala na kojem provedeno ispitivanje, određen je optičkom emisijskom spektrometrijom na spektrometru LECO GDS 850A. Rezultati analize kemijskog sastava prikazani su u tablici

1. Prema udjelu ugljika, primjesa (Si, Mn), nečistoća (P, S) i legirnih elemenata može se zaključiti da se radi o niskolegiranom čeliku oznake 55Cr3, koji se koristi za izradu opruga.

**Tablica 1. Kemijski sastav analiziranog čelika**

Maseni udio elemenata, %										
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Fe
0,53- 0,68	0,32	0,81- 0,83	<0,02	<0,02	0,75- 0,76	0,007- 0,014	0,06- 0,07	0,064- 0,080	0,006	ostatak

#### 4.3. Postupak ručnog kovanja

Kovanje izrezanog dijela provedeno je u amaterskoj kovačnici na povišenim i visokim temperaturama. Uzorak je na potrebnu temperaturu grijan na kovačkoj vatri, a toplina potrebna za grijanje uzorka dobivena je izgaranjem drvenog ugljena. Koristio se drveni ugljen jer on u svojem sastavu ima više ugljika od svih ostalih gorivih materijala koji se koriste. U područje izgaranja ugljena kroz mali okrugli otvor ubacivao se dodatni kisik pomoću ventilatora koji je bio pogonjen elektromotorom.

Neposredno prije stavljanja u vatru, površina izrezanog komada detaljno je očišćena od hrđe i drugih nečistoća pomoću žičane četke.

Da se površina čelika nije očistila, tijekom samog kovanja štetne faze bi se utisnule u strukturu materijala što bi rezultiralo pogoršanjem svojstava, a možda kasnije i pojavom površinskih pukotina.

Na slici 23. vidi se kovačka vatra.



**Slika 23. Kovačka vatra**

Ručno kovanje provedeno je u 8 ciklusa na temperaturama između 1032 °C i 533 °C. Jedan ciklus kovanja uključivao je grijanje na kovačkoj vatri, vađenje iz vatre i kovanje zagrijanog otkivka dok mu je duktilnost zbog visokih temperatura bila dovoljno dobra. Temperatura otkivka mjerena je laserskim termometrom, neposredno nakon vađenja iz vatre i prije početka kovanja te nakon prestanka kovanja. Trajanje grijanja otkivka u svakom ciklusu mjereno je ručnom štopericom. Ukupno vrijeme grijanja otkivka na kovačkoj vatri iznosilo je 796 s. U prvih 5 ciklusa provelo se grubo kovanje, a za kovanje otkivka koristio se kovački bat mase 3 kilograma. Od 6. do 8. ciklusa za kovanje se koristio lakši kovački bat mase 1 kilograma, što

predstavlja fino kovanje. Tijekom grubog kovanja veće su sile i manji je broj udaraca kako bi se približno postigao željeni oblik otkivka. Kod finog kovanja udarci su slabiji, ali precizniji. U tablici 2 prikazane su početne i završne temperature kovanja te vrijeme grijanja otkivka na kovačkoj vatri za svih 8 ciklusa. Vrijednosti početne temperature kovanja variraju između 935 i 1032 °C. S obzirom na maseni udio ugljika, čelik na ovako visokim temperaturama ima austenitnu mikrostrukturu i relativno se lako oblikuje kovanjem. Maksimalne početne temperature ne bi smjele biti previsoke da ne dođe do porasta zrna. Snižavanjem temperature smanjuje se oblikovljivost čelika i on se sve teže kuje pa se najniže temperature kovanja ne spuštaju ispod 530 °C.

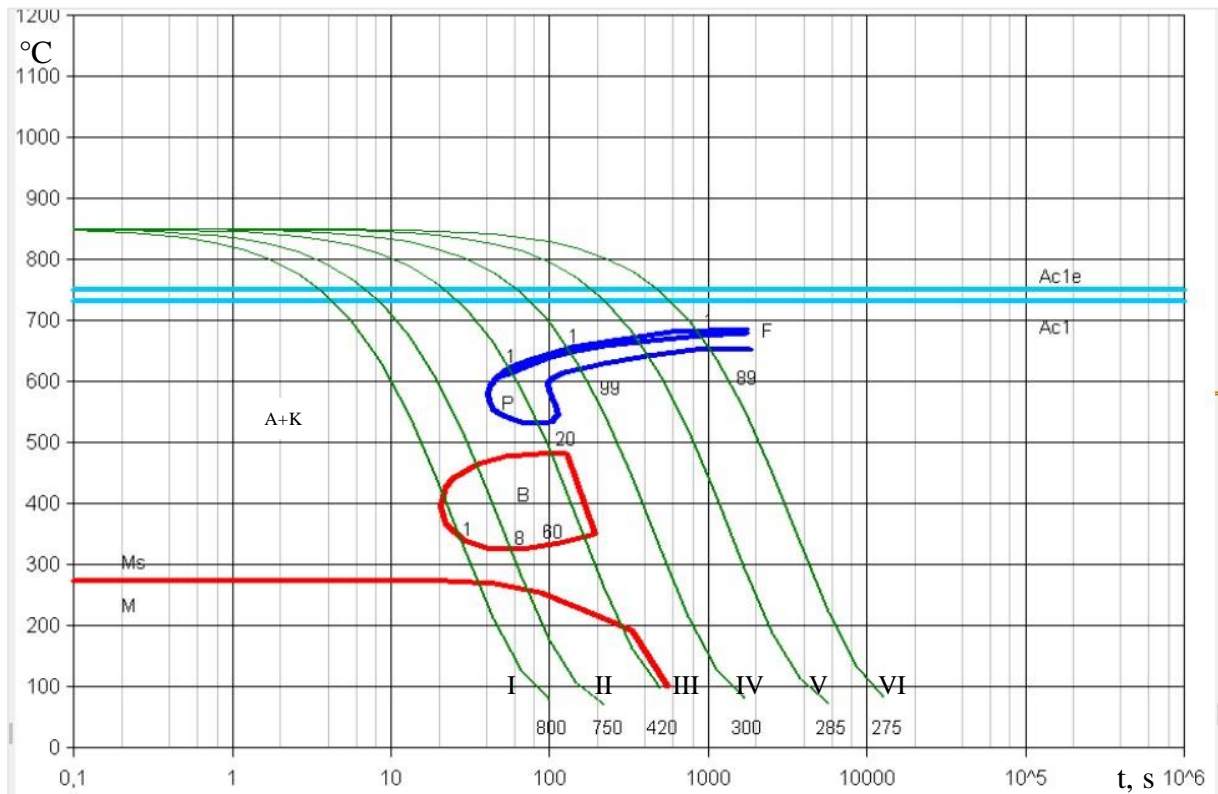
**Tablica 2. Prikaz temperatura i vremena tijekom kovanja**

Ciklus	Početna temperatura kovanja, °C	Završna temperatura kovanja, °C	Vrijeme grijanja, s
1.	1032	752	175
2.	985	758	96
3.	968	670	60
4.	940	660	120
5.	952	655	57
6.	1030	755	55
7.	948	552	180
8.	935	533	53

Kod nižih brzina hlađenja austenitna mikrostruktura prelazi uglavnom u perlit. Može biti i ferita, ali je njegov udio zanemariv. Ako se brzina hlađenja poveća osim perlita može se dobiti i određeni udio bainita te martenzita. Ako su brzine hlađenja nadkritične, austenit ispod temperature  $M_s$  prelazi u martenzit.

Na slici 24. prikazan je TTT dijagram čelika 55Cr3 s ucrtanim krivuljama hlađenja. S obzirom da se završne temperature kovanja ne spuštaju ispod 533 °C, čelik pri kovanju ima austenitnu mikrostrukturu, eventualno austenitno-perlitnu. Nakon zadnjeg kovanja otkivak se ohladi na zraku do sobne temperature. S obzirom na brzinu hlađenja u relativno mirnom zraku, ohlađivanje teče između krivulje II i III u TTT-dijagramu na donjoj slici. Kad se ohladi na sobnu temperaturu, u mikrostrukturi otkivka ima martenzita i eutektoida ( $\alpha^{id} + Fe_3C^{id}$ ) s

određenom količinom neotopljenih karbida (K), ako se pri zagrijavanju nije prekoračila temperatura  $A_{cm}$ .



Slika 24. TTT dijagram čelika 55Cr3 [19]

Slika 25. pokazuje usijani otkivak neposredno nakon što je izvađen iz vatre i spreman za novi ciklus kovanja.

Na slici 26. vidi se otkivak nakon završenog grubog kovanja. Na istoj slici vidi se laserski termometar s prikazanom temperaturom površine otkivka.



**Slika 25. Usijani otkivak prije početka kovanja**



**Slika 26. Otkivak nakon zadnjeg ciklusa grubog kovanja**



**Slika 27. Završno kovanje prednjeg dijela mačete**

Slika 27. pokazuje skoro završni oblik mačete. Zbog opetovanog grijanja i hlađenja, a osobito zbog kovanja, mačeta je poprimila zakrivljeni oblik.

Nakon zadnjeg ciklusa kovanja mačeta je ostavljena da se ohladi na zraku do sobne temperature. Hlađenje je trajalo oko 20 minuta.

Na slici 28. vidi se iskovana mačeta.



**Slika 28. Mačeta nakon kovanja**



#### 4.4. Zavarivanje drške

Nakon kovanja na užu stranu mačete zavaren je dio koji se kasnije uglavi u drveni držak. Dok se ne uglavi u drveni držak, služi za bolji prihvat otkivka u škripac pri naknadnom brušenju. Dio koji se zavaruje izrezan je iz šipke od armaturnog čelika i obostrano zavaren ručno-elektrolučnim postupkom zavarivanja.

Na slici 29. vidi se zavareni dio na otkivku.

Zbog velikog unosa topline na površini čelika u području zavarenog spoja došlo je do nastanka oksida koji su obojili površinu različitim nijansama boja. Uz liniju staljivanja nalazi se visokotemperaturna zona utjecaja topline (ZUT) u kojoj su mikrostrukturne promjene intenzivnije. Na nju se nastavlja nisko-temperaturni ZUT u kojem su promjene mikrostrukture manje izražene i koji postupno prelazi u osnovni materijal.



Slika 29. Prikaz zavora na otkivku

#### 4.5. Brušenje mačete

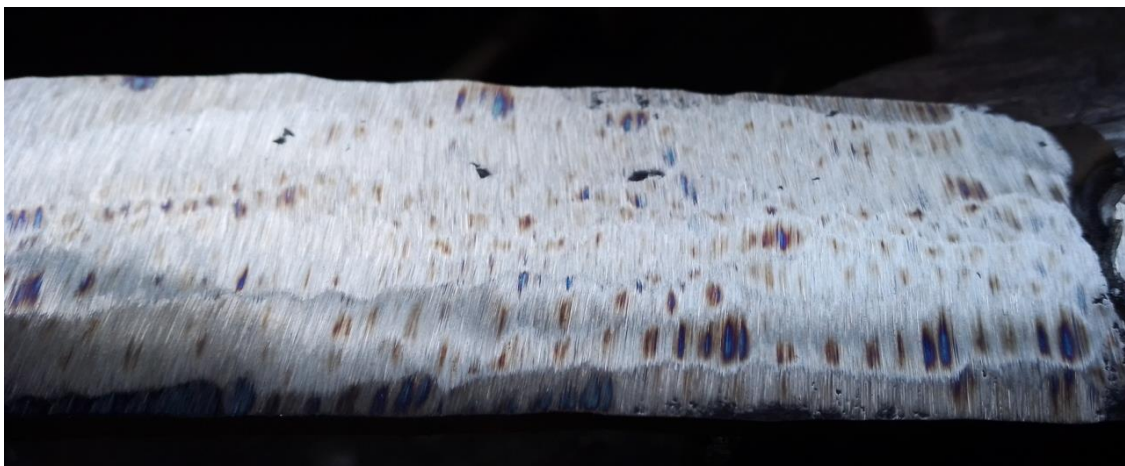
Kako bi se s površine mačete skinuli oksidi nastali tijekom zagrijavanja na otvorenom plamenu te smanjila hrapavost površine i završno oblikovala oštrica mačete, provedeno je brušenje otkivka. Brušenje je provedeno u nekoliko koraka, od grubljeg prema finijem. Ovakav alat služi

za sječenje tanjih drvenih grana i sličnih materijala pa je potrebno da ima odgovarajući oblik i kvalitetno izrađenu oštricu. Za brušenje se koristila stolna i ručna brusilica te turpija.

Na slici 30. prikazana je mačeta nakon grubog brušenja, a na slici 31. vidi se izgled grubo brušene površine.



**Slika 30. Mačeta nakon grubog brušenja**



**Slika 31. Površina mačete nakon grubog brušenja**

Na slici 32. prikazana je mačeta nakon finog brušenja, a na slici 33. prikazan je izgled fino brušene površine. Na obje slike jasno se vidi rub oštrice koji je još nepravilan i nije završno obrađen.



**Slika 32. Mačeta nakon finog brušenja**



**Slika 33. Površina mačete nakon finog brušenja**

Nakon što je površina mačete fino pobrušena, na stolnoj brusilici poravnata je oštrica alata, slika 34. Također se ravna i površina nasuprotna oštrici alata, što je prikazano na slici 35.



**Slika 34. Poravnanje oštrice mačete na stolnoj brusilici**



**Slika 35. Poravnanje plohe nasuprotne oštrici mačete**

Nakon poravnanja oštrice i ostalih ploha na mačeti, ručnom turpijom skinuti su zaostali srhovi na bridovima alata i dodatno je obrađena oštrica. Na slici 36. prikazana je oštrica mačete nakon obrade turpijom.



**Slika 36. Oštrica mačete nakon oštrenja turpijom**

Kako bi se dodatno poboljšala kvaliteta oštrice i funkcionalnost same mačete, nakon obrade turpijom oštrica je dodatno obrađena brusnim papirom kvalitete P100 i P240.

Na slici 37. vidi se oštrica mačete nakon završne obrade brusnim papirom kvalitete P240.



**Slika 37. Oštrica mačete nakon završnog oštrenja brusnim papirom**

Na slici 38. prikazana je izrađena mačeta iz koje su izrezani uzorci za analizu mikrostrukture i mjerenje mikrotvrdoće.

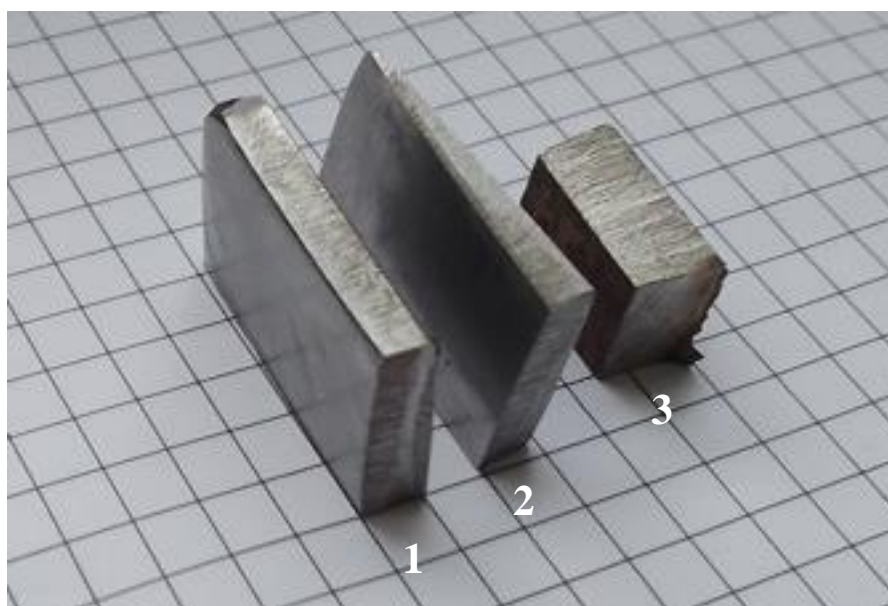


**Slika 38. Mačeta nakon završene obrade**

#### 4.6. Mikrostruktorna karakterizacija

Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, na optičkom mikroskopu. Analiza je provedena u poliranom i nagrizenom stanju. Korištena su povećanja 50×, 100×, 200×, 500× i 1000×.

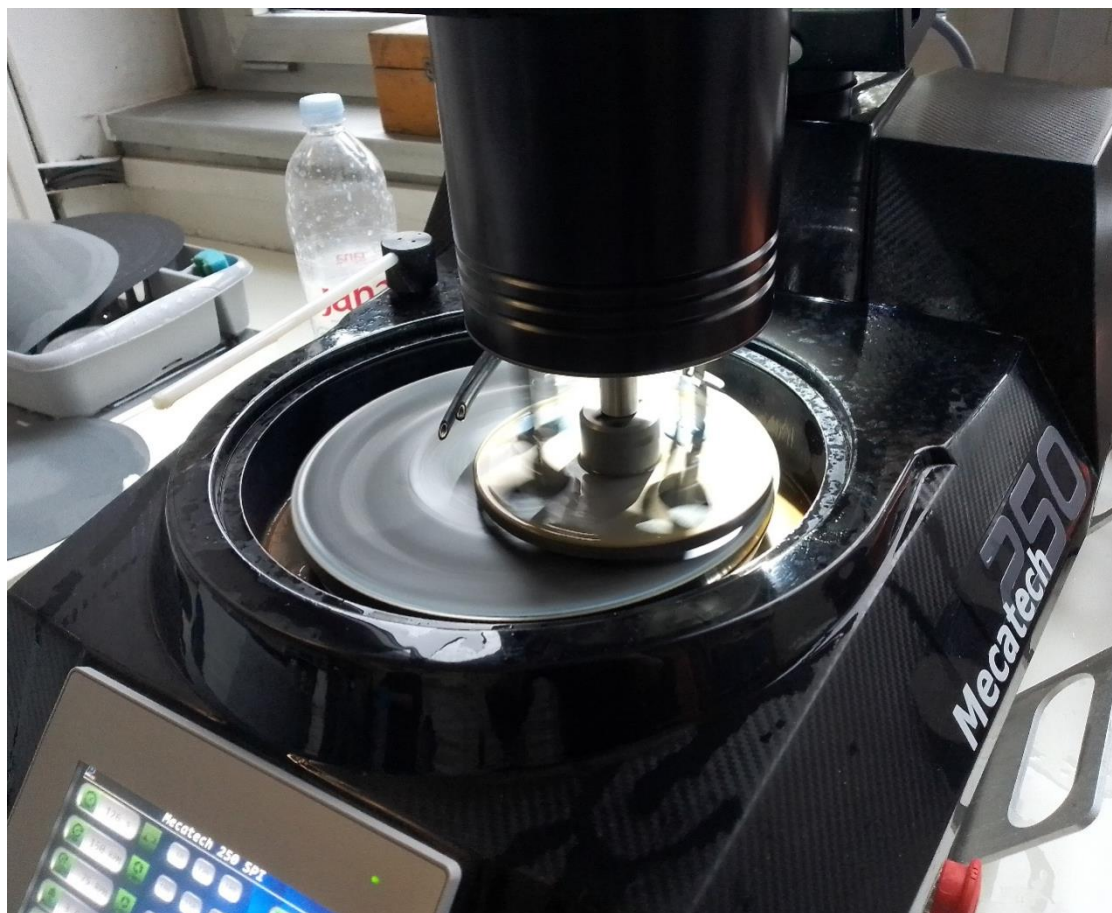
Slika 39. prikazuje uzorke neposredno prije stavljanja u polimernu masu. Prvi i drugi uzorak su izrezani iz gotove iskovane mačete dok je treći uzorak uzet kao osnovni materijal i izrezan direktno s lista opruge prije kovanja.



**Slika 39. Uzorci za analizu mikrostrukture prije zalijevanja u masu**

Na prvom i drugom uzorku analizirana je mikrostruktura u poprečnom presjeku mačete, nasuprot oštrici (1) i na strani oštrice (2). Na istim uzorcima izmjerena je i mikrotvrdoća HV0,2. Polimerna masa u koju su se zalili uzorci dobivena je miješanjem dviju mjerica praha i jedne mjerice tekućine. Uzorak je stavljen u gumeni kalup i zaliven navedenom mješavinom. Trebalo je dvadesetak minuta da masa otvrdne nakon čega je uzorak izvađen iz kalupa.

Brušenje i poliranje je izvedeno na uređaju Mecatech 250, prikazanom na slici 40. Kod brušenja se glavna ploča rotirala brzinom od 300 o/min, a hlađenje i podmazivanje obavljalo se vodom.



**Slika 40. Uređaj za brušenje i poliranje**

Granulacija brusnog papira postupno se mijenjala od grubljih prema finijim abrazivnim česticama. Krenulo se s brusnim papirom kvalitete P320, nastavilo s kvalitetom P600, P1000 i P2400 te završilo s papirom kvalitete P4000. Na svim brusnim papirima abrazivne čestice su bile od silicijevog karbida (SiC).

Nakon brušenja, uslijedilo je poliranje u 2 koraka. Pri poliranju glavna ploča se rotirala brzinom od 150 o/min. U prvom se koraku na tkaninu za poliranje stavlja dijamantna pasta od 3  $\mu\text{m}$ , koja se razmazala po tkanini za poliranje. Za hlađenje i podmazivanje pri poliranju koristio se lubrikant. Kod drugog koraka poliranja koristila se tekućina za poliranje s još finijim abrazivnim česticama od 0,03  $\mu\text{m}$ .

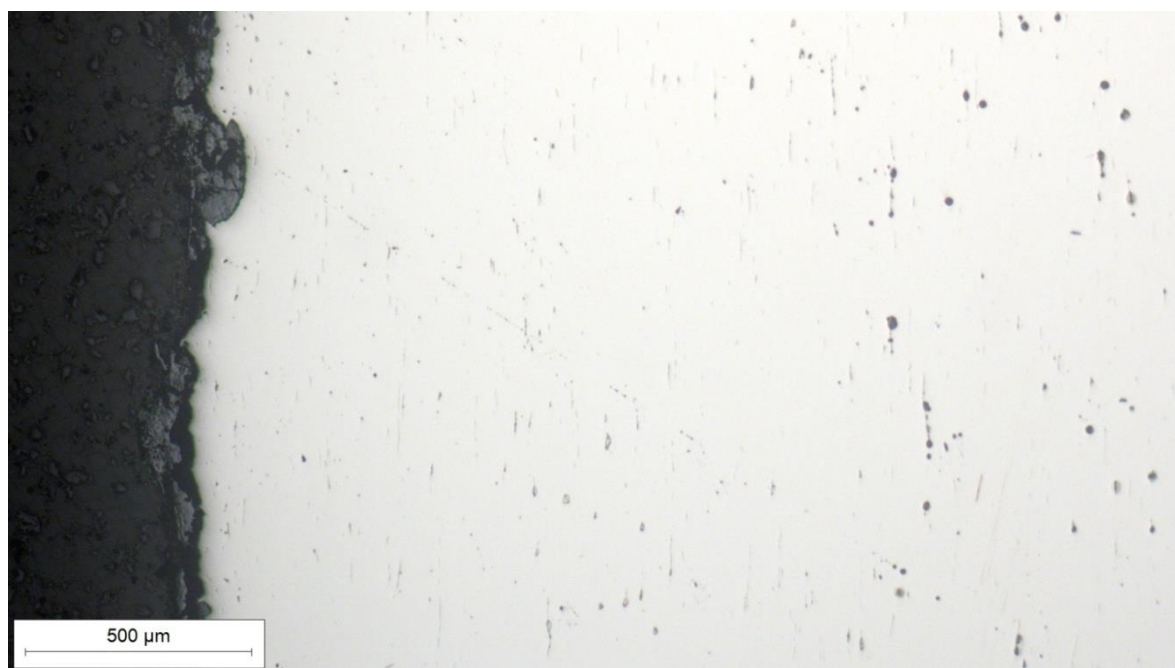
Nakon završnog poliranja površina uzorka spremna je za analizu mikrostrukture u poliranom stanju. U poliranom stanju mogu se jasno vidjeti eventualne pukotine i šupljine te raspored, veličina i oblik pojedinih uključaka.

Na slici 41. i slici 42. vidi se mikrostruktura uzorka osnovnog materijala prije kovanja u poliranom stanju, snimljena pri povećanju 50 $\times$  uz rub površine. Na obje slike jasno se vide



uključci manganovog sulfida. Kako je list opruge, koja je poslužila kao polazni materijal za mačetu, intenzivno plastično deformiran, uključci su izrazito usmjereni. Na površini uzorka vide se korozijski produkti i oštećenja izazvana korozijom.

Volumni udio čestica manganovog sulfida u osnovnom materijalu prije kovanja je oko 1,9 %. Volumni udio određen je uz pomoć računalnog programa Image J, poluautomatiziranog sustava za analizu slike.



**Slika 41. Mikrostruktura osnovnog materijala prije kovanja u poliranom stanju (lijevi rub) snimljena pri povećanju 50×**



**Slika 42. Mikrostruktura osnovnog materijala prije kovanja u poliranom stanju (desni rub) snimljena pri povećanju 50×**

Na slikama koje slijede prikazane su fotografije mikrostrukture poprečnog presjeka kovane mačete, u poliranom stanju.



**Slika 43. Mikrostruktura poprečnog presjeka mačete nasuprot oštrici, snimljeno pri povećanju 50×**



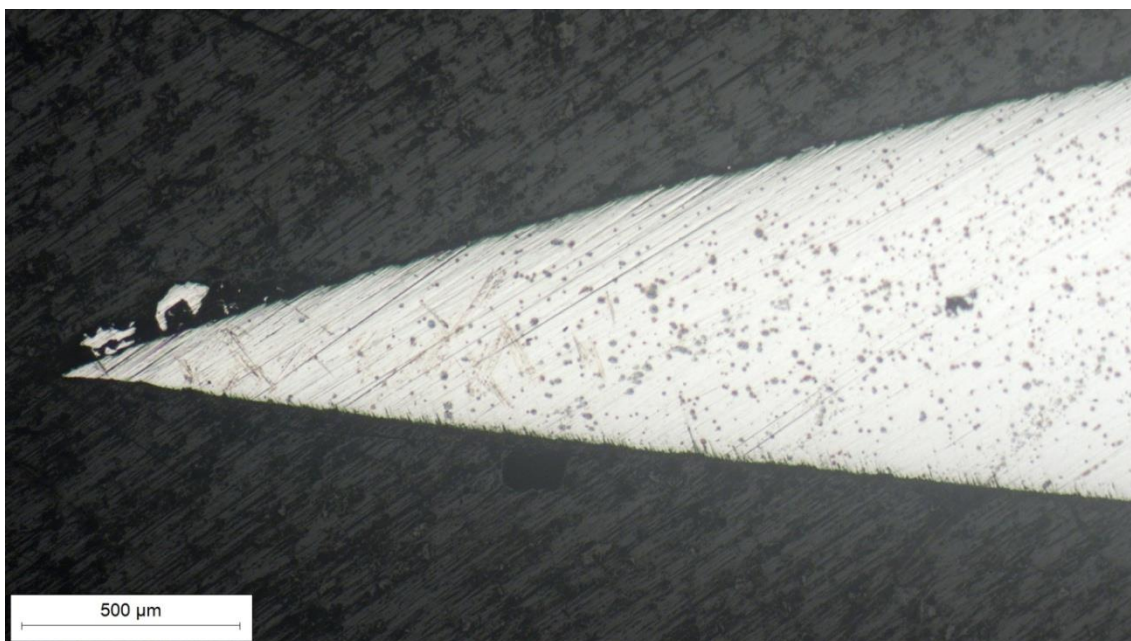
**Slika 44. Mikrostruktura poprečnog presjeka mačete u sredini, snimljeno pri povećanju 50×**

Na slici 43. vidi se mikrostruktura poprečnog presjeka u dijelu mačete koji se nalazi nasuprot oštrici, a na slici 44. isti presjek u sredini. Na slikama se jasno vide ravnomjerno raspoređene nakupine manganovog sulfida koje su zbog intenzivnog kovanja na visokoj temperaturi poprimile kuglasti oblik.

Volumni udio čestica manganovog sulfida u dijelu mačete koji se nalazi nasuprot oštrici iznosi oko 2,4 %, a u sredini poprečnog presjeka iznosi oko 1,4 %.

Na slici 45. prikazana je mikrostruktura poprečnog presjeka mačete u području oštrice. Ovaj dio mačete je vrlo intenzivno kovan, više nego dijelovi prikazani na slici 43. i 44. Vjerojatno je to uzrok većeg udjela čestica manganovog sulfida koje se vide na slici.

Najviši volumni udio čestica manganovog sulfida izmjeren je u oštrici mačete i iznosi oko 4,5 %.

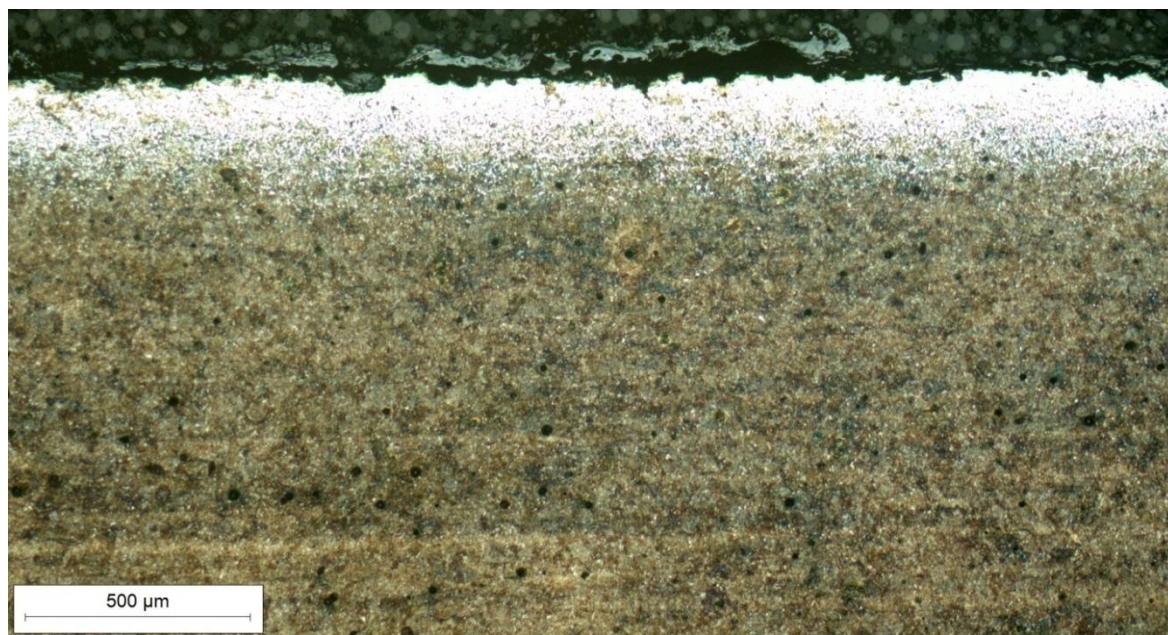


**Slika 45. Mikrostruktura poprečnog presjeka oštrice mačete, snimljeno pri povećanju 50×**

Nakon analize mikrostrukture poprečnog presjeka osnovnog materijala i mačete u poliranom stanju, provedeno je nagrizanje površine uzoraka kako bi se otkrila njihova mikrostruktura. Površina uzoraka nagrizana je u 3 %-tnom Nitalu, otopini koja se sastoji od 97 % etilnog alkohola i 3 % dušične kiseline. Uzorak je uronjen u navedenu otopinu na par sekundi, a nakon toga uranja se u destiliranu vodu kako bi se prekinula kemijska reakcija i kako se površina uzorka ne bi previše nagrizla.

Fotografije koje slijede prikazuju mikrostrukturu osnovnog materijala i mikrostrukturu poprečnog presjeka mačete, snimljenu pri različitom povećanju.

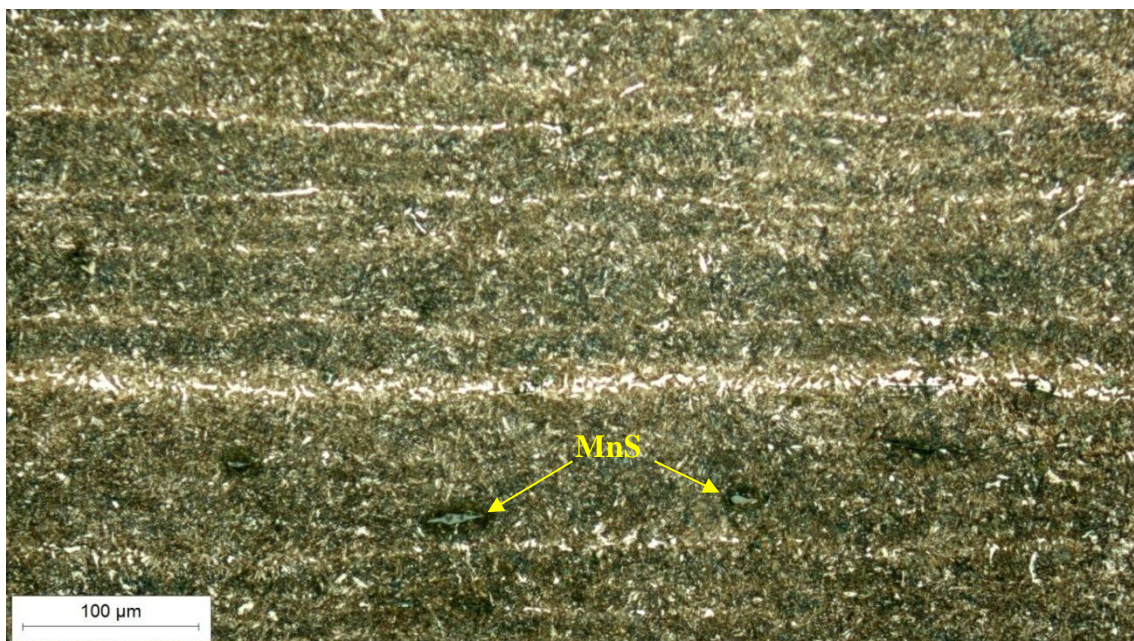
Na slici 46. vidi se mikrostruktura osnovnog materijala uz rub lista opruge prije kovanja, u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 50×. Mikrostruktura je homogena, a na površini se vide korozijski produkti.



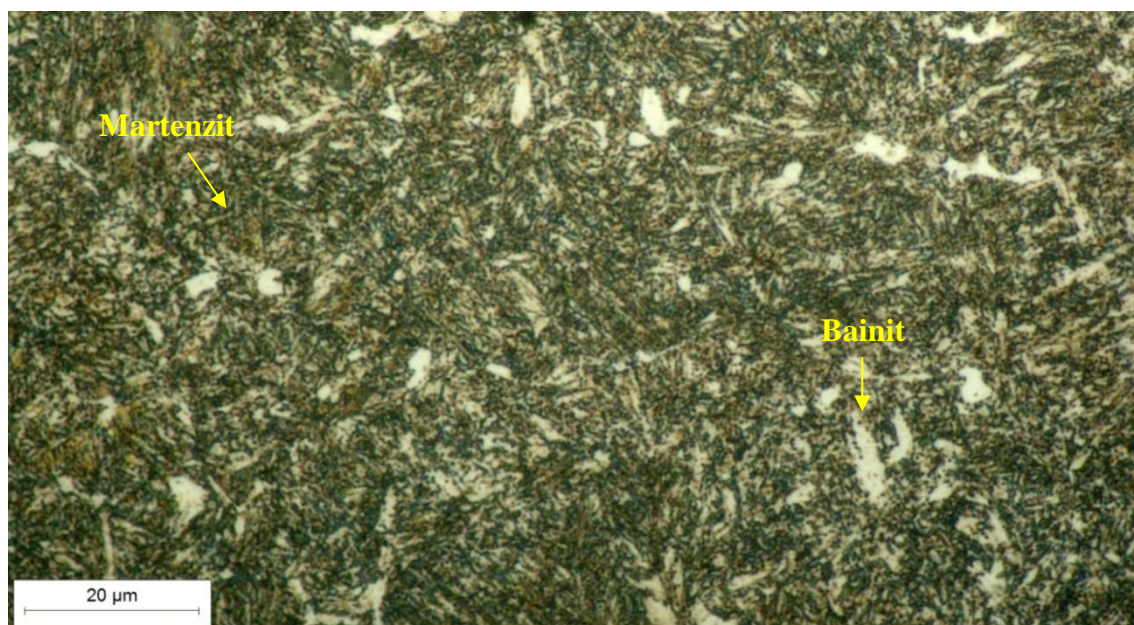
**Slika 46. Mikrostruktura osnovnog materijala prije kovanja u nagriženom stanju, snimljeno pri povećanju 50×**

Na slici 47. prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala u sredini lista opruge prije kovanja, snimljena pri povećanju 200×. Mikrostruktura je usmjerena i relativno sitnozrnata, što je posljedica prethodne plastične obrade. Mogu se uočiti svjetlija i tamnija kristalna zrna, a mjestimice se vide i sive nakupine manganovih sulfida (MnS).

Pri većem povećanju, na slici 48., vidi se ista mikrostruktura snimljena pri povećanju 1000×. S obzirom da je kao polazni materijal za izradu mačete poslužio list lisnate opruge, za kojeg se može pretpostaviti da se nalazi u kaljenom i popuštenom stanju te s obzirom na kemijski sastav čelika i usporedbu izgleda mikrostrukture u literaturnim izvorima [20], mikrostruktura se vjerojatno sastoji od bainita i martenzita. Svjetlija zrna su bainitna, a tamnija su igličasti martenzit. Nakon što se izmjeri mikrotvrdoća materijala, moći će se s većom sigurnošću utvrditi udio bainita i martenzita u mikrostrukturi osnovnog materijala.



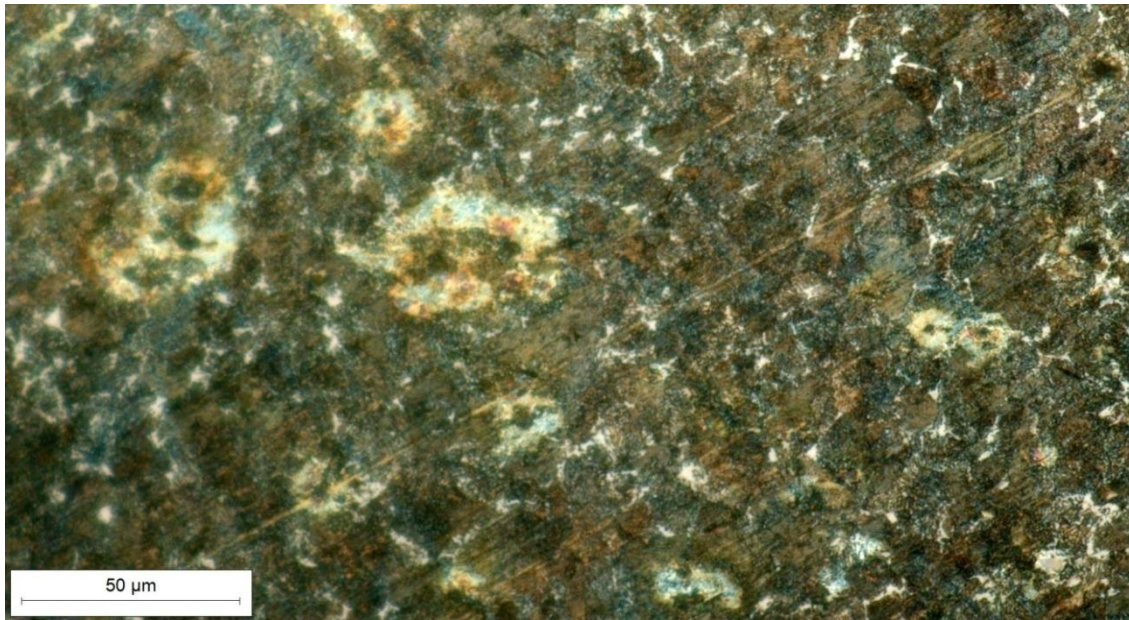
**Slika 47.** Mikrostruktura osnovnog materijala u sredini presjeka prije kovanja, snimljeno pri povećanju 200×



**Slika 48.** Mikrostruktura osnovnog materijala u sredini presjeka prije kovanja, snimljeno pri povećanju 1000×

Na slikama koje slijede prikazana je mikrostruktura poprečnog presjeka iskovane mačete. Na slici 49. vidi se mikrostruktura mačete na tupoj strani, nasuprot oštrici. Ovaj dio mačete nije bio izložen intenzivnom kovanju, ali se mikrostruktura ipak razlikuje od mikrostrukture osnovnog materijala prije kovanja na visokoj temperaturi. S obzirom da se mačeta pri kovanju

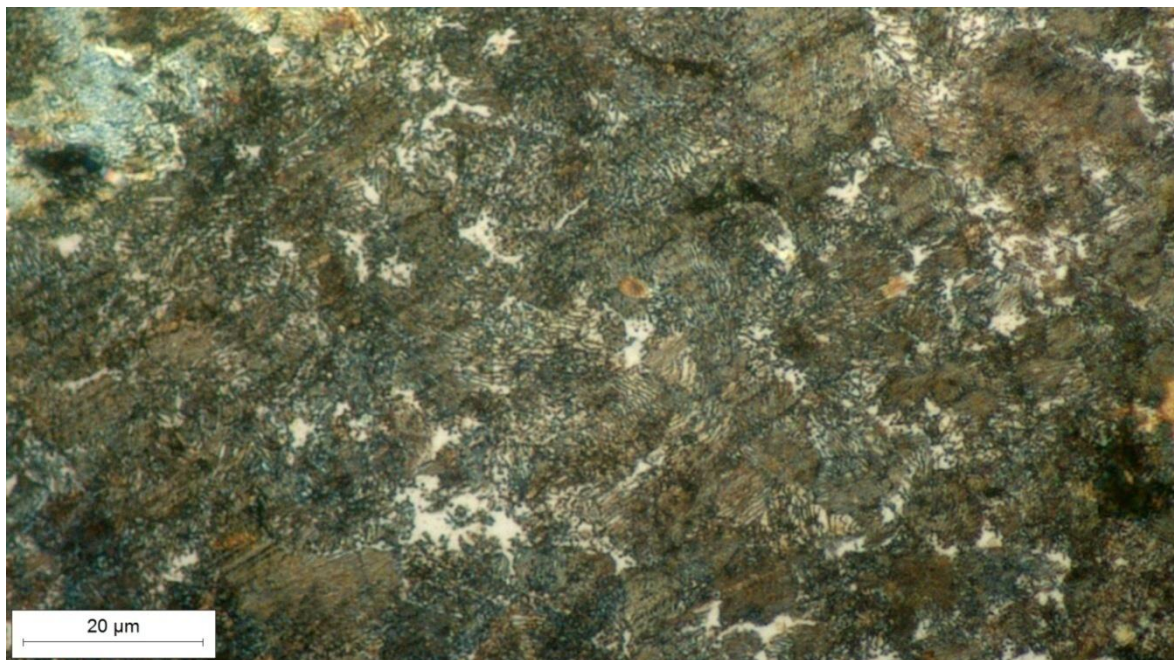
hladila kontinuirano na zraku pri brzini ohlađivanja od oko 5 °C/s, iz TTT-dijagrama za ovaj čelik (slika 24.) može se vidjeti da će postignuta mikrostruktura biti sastavljena od bainita i martenzita. Mjestimice se u strukturi vide i neotopljeni sitni karbidi po granicama zrna.



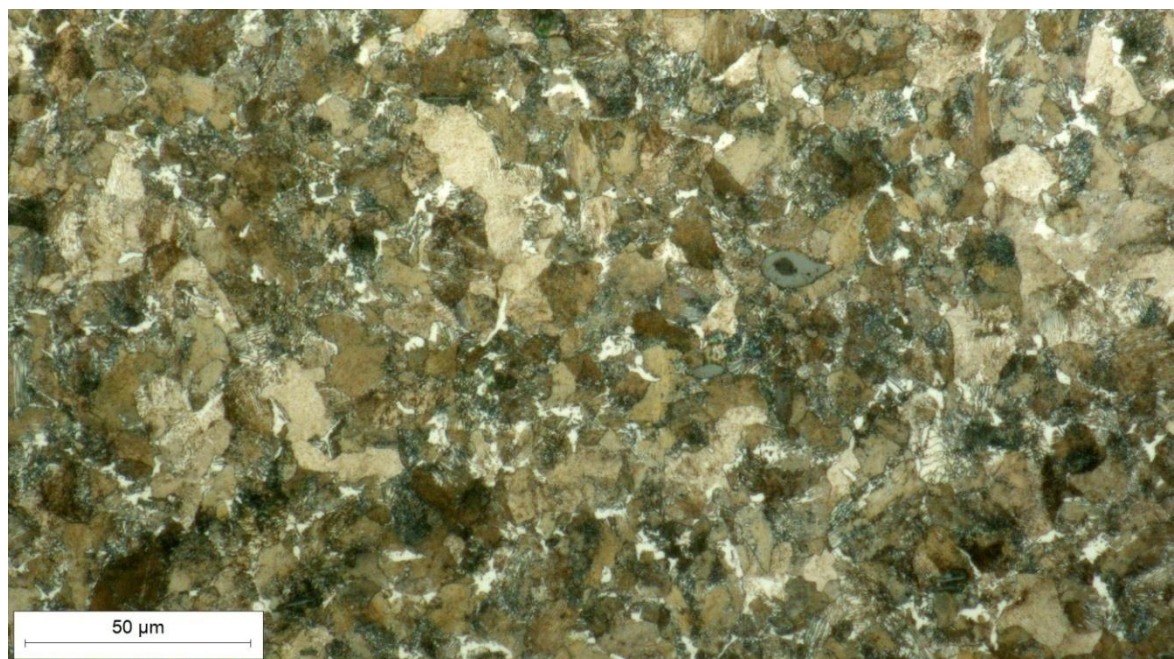
**Slika 49. Mikrostruktura poprečnog presjeka mačete sastrane nasuprot oštrici, snimljeno pri povećanju 500×**

Na slici 50. prikazano je isto područje uz veće povećanje. Ovdje se jasnije vidi lamelarna struktura bainitnih zrna koja većinski čine mikrostrukturu, a nazire se i utjecaj kovanja na izgled kristalnih zrna.

Na slici 51. vidi se mikrostruktura u sredini poprečnog presjeka mačete.



**Slika 50.** Mikrostruktura poprečnog presjeka mačete sa strane nasuprot oštrici, snimljeno pri povećanju 1000×



**Slika 51.** Mikrostruktura mačete u sredini poprečnog presjeka, snimljeno pri povećanju 500×





**Slika 52. Mikrostruktura mačete u sredini poprečnog presjeka, snimljeno pri povećanju 1000×**

Na slici 53. prikazana je mikrostruktura u oštrici mačete, snimljena pri povećanju 500×. Ovaj dio mačete je vrlo intenzivno kovan, više nego drugi dijelovi. Mikrostruktura je slična mikrostrukturi u središnjem dijelu. Sastoji se od martenzita i bainita, a mjestimice se mogu uočiti i sitni karbidi izlučeni po granicama zrna.



**Slika 53. Mikrostruktura u oštrici mačete, snimljena pri povećanju 500×**

#### 4.7. Ispitivanje mikrotvrdoće

Ispitivanje mikrotvrdoće HV0,2 provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno Vickersovom metodom, gdje je dijamantna četverostrana piramida s vršnim kutom od  $136^\circ$  služila kao indentor te se silom  $F$  utiskivala u materijal.

Na slici 54. prikazan je tvrdomjer na kojem se ispitivala mikrotvrdoća. Sila pritiska iznosila je 1,962 N, a ostvarivala se pomoću utega mase 200 g.

Ukupno je provedeno 30 mjerenja, a mjesta ispitivanja označena su na slici 55. Na svakom mjestu su provedena po 3 mjerenja. Na kraju je izračunata srednja vrijednost tvrdoće na pojedinoj lokaciji uzorka.

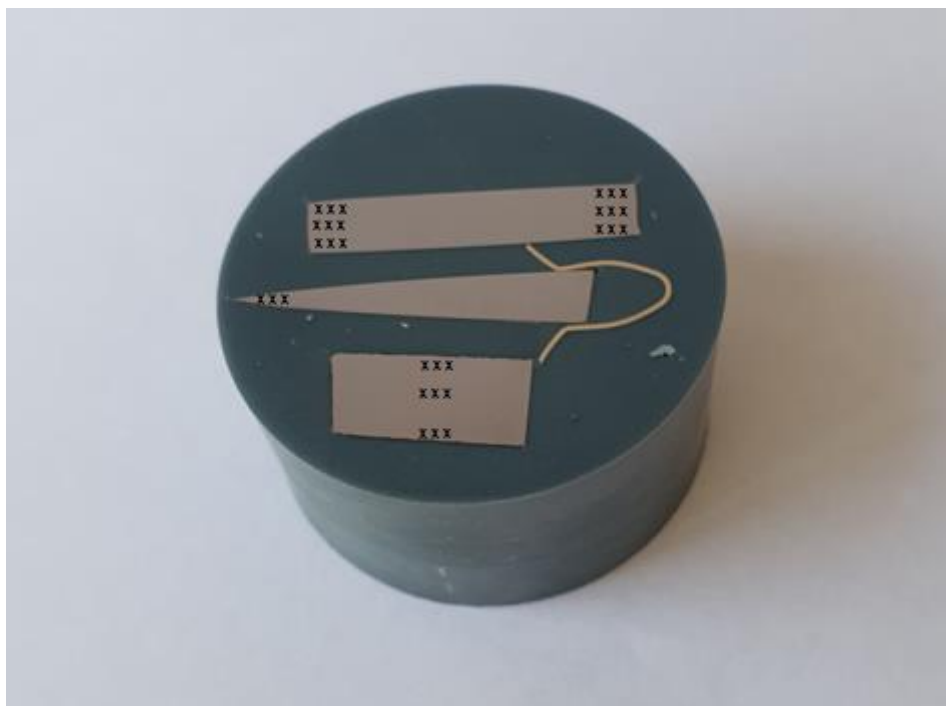
U tablici 3 prikazani su rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 na osnovnom materijalu prije kovanja.

U tablici 4 vide se rezultati mjerenja mikrotvrdoće na poprečnom presjeku mačete, na tupom dijelu, a u tablici 5. prikazani su rezultati dobiveni pri mjerenju u sredini poprečnog presjeka.

Rezultati mjerenja tvrdoće na poprečnom presjeku u blizini oštrice prikazani su u tablici 6.



Slika 54. Mikrotvrdomjer PMT3



Slika 55. Pozicije mjerenja mikrotvrdoće HV0,2

**Tablica 3. Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 osnovnog materijala prije kovanja**

	lijevi rub	sredina	desni rub
1.	480	501	391
2.	490	470	460
3.	450	575	399
<b>srednja vrijednost</b>	<b>473</b>	<b>515</b>	<b>417</b>

**Tablica 4. Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 poprečnog presjeka uz tupi dio mačete**

	lijevi rub	sredina	desni rub
1.	480	575	415
2.	490	423	415
3.	470	415	391
<b>srednja vrijednost</b>	<b>480</b>	<b>471</b>	<b>407</b>

**Tablica 5. Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 u sredini poprečnog presjeka mačete**

	lijevi rub	sredina	desni rub
1.	383	423	512
2.	349	423	362
3.	391	483	423
<b>srednja vrijednost</b>	<b>374</b>	<b>410</b>	<b>432</b>

**Tablica 6. Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 u poprečnom presjeku pri oštrici mačete**

	oštrica
1.	460
2.	524
3.	460
<b>srednja vrijednost</b>	<b>481</b>

## 4.8. Analiza rezultata

### 4.8.1. Osvrt na rezultate analize kemijskog sastava

Analizom kemijskog sastava utvrđeno je da je čelik 55Cr3 niskolegirani čelik sa sadržajem ugljika od 0,53 do 0,68 %. Čelik sadrži određenu količinu silicija i mangana. Udio sumpora i fosfora, koji su nečistoće u čeliku, vrlo je nizak ( $< 0,02\%$ ) i zbog toga ovaj čelik pripada skupini plemenitih čelika. Čelik je legiran kromom (oko 0,75 %), a od ostalih legiranih elemenata, pojavljuju se nikel, molibden, vanadij te bakar. Kako nijednog legiranih elemenata nema više od 5 %, čelik možemo svrstati u niskolegirane čelike. Prema normi EN 10089:2002 ovaj čelik se svrstava u vruće valjane čelike za kaljene i popuštene opruge.

### 4.8.2. Osvrt na rezultate analize mikrostrukture

S obzirom da je mačeta izrađena od čeličnog komada koji je prethodno bio u sastavu lisnate opruge koja je sigurno toplinski obrađena kaljenjem i popuštanjem, njegova mikrostruktura sastojala se od bainita i martenzita. Kristalna zrna su usmjerena i relativno sitna, što je

posljedica prethodne plastične obrade. U poliranom stanju mjestimice se vide sive nakupine manganovog sulfida (MnS).

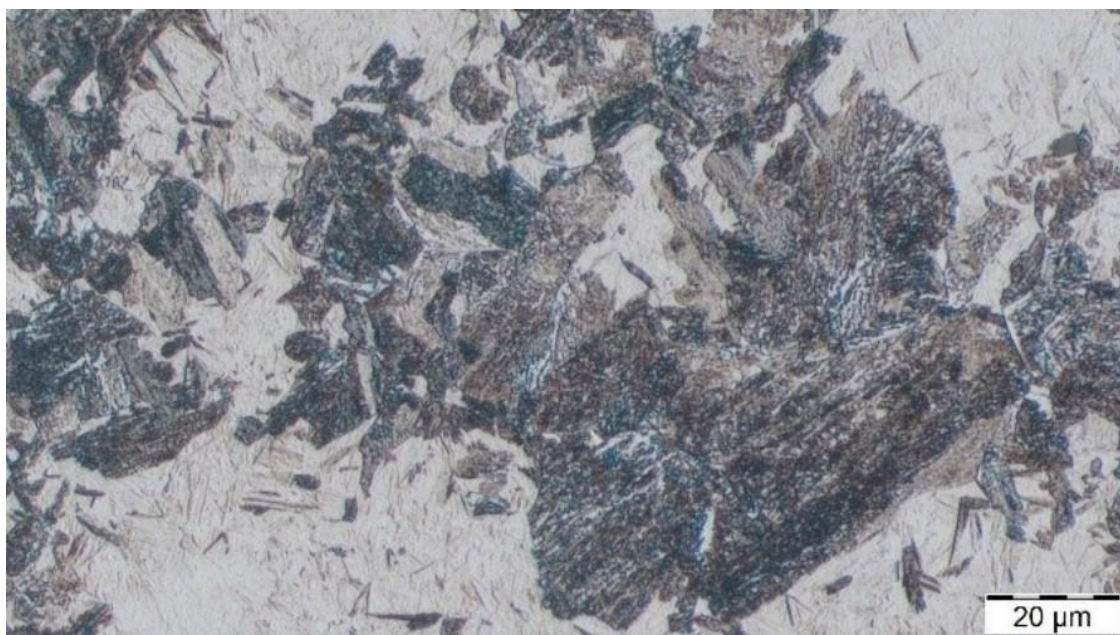
Nakon 8 ciklusa ručnog kovanja na temperaturama između 1032 i 533 °C i hlađenja na zraku do sobne temperature, mikrostruktura na poprečnom presjeku iskovane mačete sastoji se od bainita i martenzita, a mjestimice se vide i neotopljeni karbidi po granicama kristalnih zrna. Kako se mačeta nakon zadnjeg ciklusa kovanja hladila kontinuirano na zraku pri brzini ohlađivanja od oko 5 °C/s, praćenjem transformacije austenita u TTT-dijagramu za ovaj čelik dolazi se do bainitno-martenzitne mikrostrukture. Omjer između volumnog udjela bainita i martenzita nije isti na različitim dijelovima poprečnog presjeka. Sitni, neotopljeni karbidi po granicama kristalnih zrna najuočljivi su u oštrici mačete.

Intenzitet kovanja različitih dijelova mačete nije bio isti pa postoji razlika u stupnju ugnječenosti mikrostrukture.

Usporedbom mikrostrukture poprečnog presjeka iskovane mačete s izgledom mikrostrukture istog čelika u literaturnim izvorima, za sličan režim hlađenja vidi se velika podudarnost u izgledu mikrostrukture. Na slici 56. i slici 57. prikazan je izgled mikrostrukture čelika 55Cr3 nakon kaljenja pri brzini ohlađivanja od 10 °C/s i 1 °C/s. Mikrostruktura se sastoji od bainita i martenzita. Bržim hlađenje bi se dobila potpuno martenzitna mikrostruktura, a sporijim hlađenjem potpuno perlitna mikrostruktura [20].



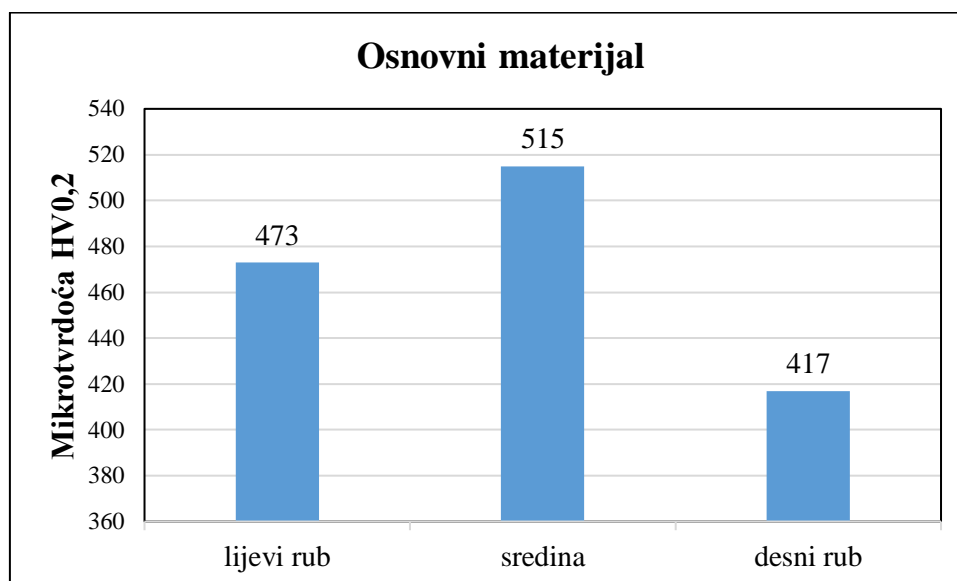
**Slika 56.** Mikrostruktura gašenog čelika 55Cr3 za brzinu gašenja od 10 °C/s [20]



Slika 57. Mikrostruktura gašenog čelika 55Cr3 za brzinu gašenja od 1 °C/s [20]

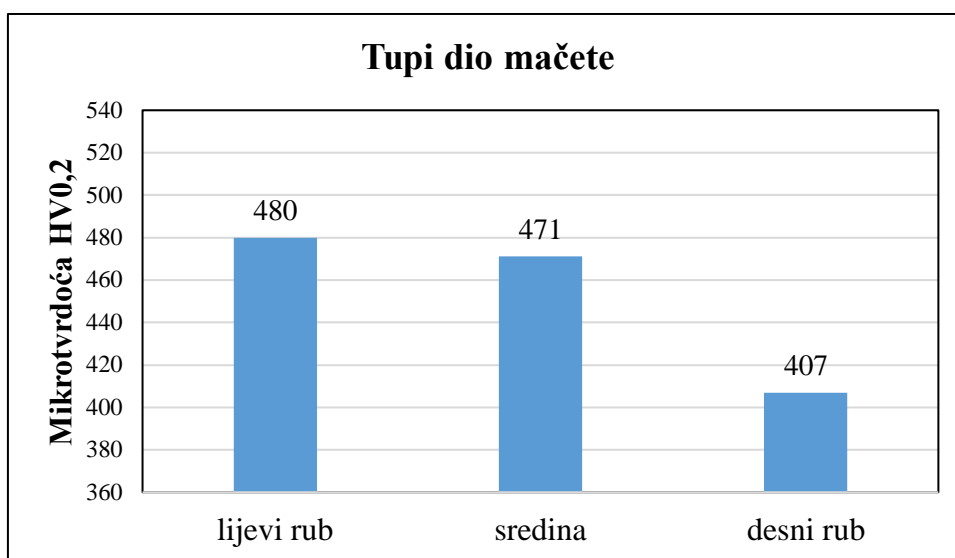
#### 4.8.3. Osvrt na rezultate mjerenja mikrotvrdoće HV0,2

Mikrotvrdoća HV0,2 osnovnog materijala izmjerena na poprečnom presjeku lista lisnate opruge odgovara mikrotvrdoći čelika 55Cr3 u kaljenom i popuštenom stanju i mikrostrukturi sastavljenoj od bainita i martenzita. Mikrotvrdoća u sredini lista je najviša i iznosi 515 HV0,2, a na rubovima je nešto niža.

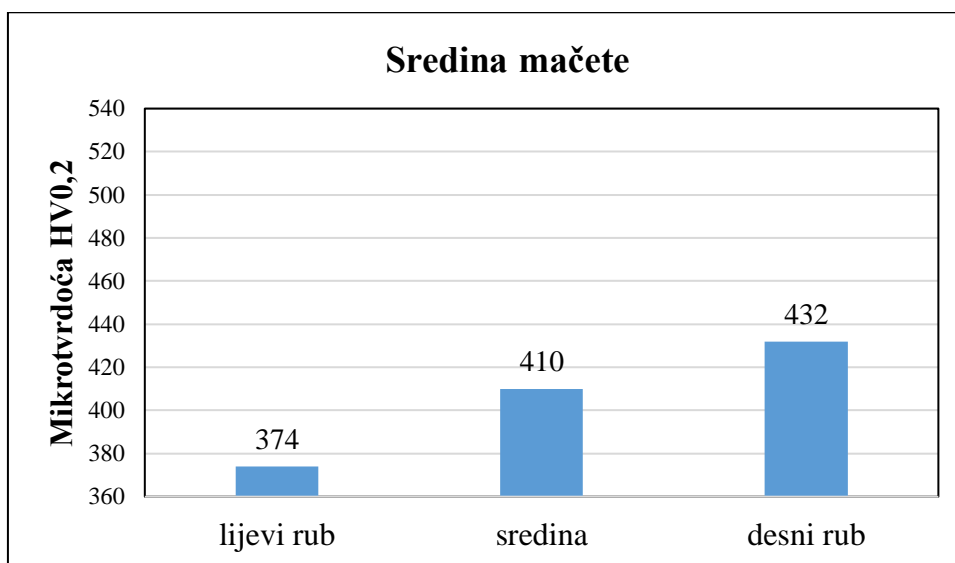


Slika 58. Mikrotvrdoća HV0,2 u osnovnom materijalu

Mikrotvrdoća izmjerena na poprečnom presjeku gotove mačete nakon kovanja i hlađenja, nije bila ista u svim dijelovima poprečnog presjeka. Na tupom dijelu mačete izmjerene su mikrotvrdoće između 407 HV<sub>0,2</sub> i 480 HV<sub>0,2</sub>. U dijagramu na slici 59. vide se srednje vrijednosti izmjerenih mikrotvrdoća na lijevom i desnom rubu te u sredini presjeka tupog dijela mačete. Ovaj dio mačete, u odnosu na druge dijelove poprečnog presjeka, je najmanje podvrgnut kovanju. U sredini mačete dobivene su najniže srednje vrijednosti mikrotvrdoće, između 374 HV<sub>0,2</sub> i 432 HV<sub>0,2</sub>. Na slici 60. vide se srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća u sredini presjeka gotove mačete.



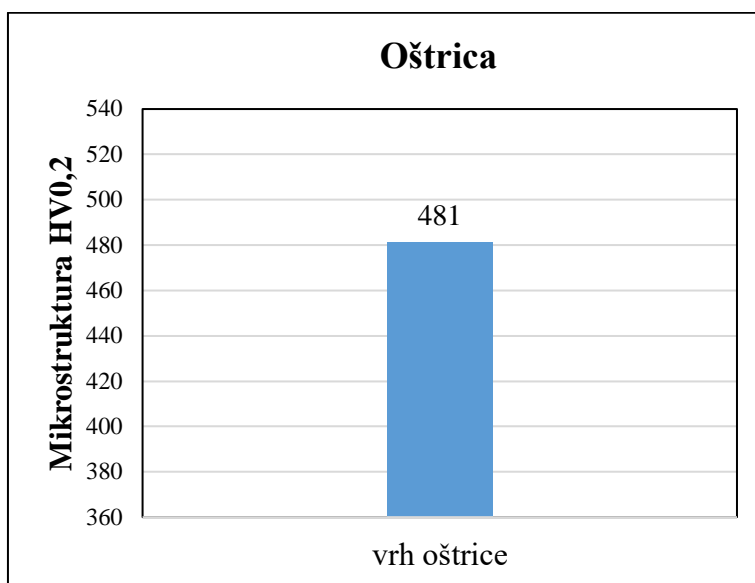
Slika 59. Mikrotvrdoća HV<sub>0,2</sub> za tupi dio mačete



Slika 60. Mikrotvrdoća HV<sub>0,2</sub> u sredini poprečnog presjeka mačete



U dijagramu na slici 61. prikazana je srednja vrijednost mikrotvrdoće u oštrici na poprečnom presjeku mačete. Na tom dijelu izmjerene su vrijednosti mikrotvrdoće od 460 HV<sub>0,2</sub> do 524 HV<sub>0,2</sub> i dobivena je najviša srednja vrijednost mikrotvrdoće, oko 481 HV<sub>0,2</sub>. To se podudara s mikrostrukturom u ovom području gdje su po granicama kristalnih zrna izlučeni sitni sekundarni karbidi. U odnosu na druge dijelove mačete, oštrica je izložena najintenzivnijem kovanju pa je i to moglo doprinijeti povećanju mikrotvrdoće.



Slika 61. Mikrotvrdoća HV<sub>0,2</sub> pri oštrici mačete

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je provedena karakterizacija ručno kovane mačete izrađene od čelika nepoznatog sastava. Ručno kovanje je provedeno na temperaturi između 533 i 1032 °C, u 8 ciklusa. Hlađenje do sobne temperature provedeno je na zraku. Na temelju provedenih ispitivanja i pritom dobivenih rezultata, može se zaključiti sljedeće:

Analizom kemijskog sastava utvrđeno je da je mačeta izrađena od niskolegiranog čelika za opruge oznake 55Cr3 sa sadržajem ugljika između 0,53 % i 0,68 % te udjelom kroma od oko 0,75 %.

Mikrostruktura materijala prije kovanja sastavljena je od bainita i martenzita, a srednja vrijednost izmjerene mikrotvrdoće u poprečnom presjeku je između 417 HV<sub>0,2</sub> i 515 HV<sub>0,2</sub>.

Mikrostruktura u poprečnom presjeku izrađene mačete sastoji se od bainita i martenzita, a u području oštrice uočena je i vrlo mala količina sitnih karbida izlučenih po granicama kristalnih zrna. Omjer između volumnog udjela martenzita i bainita nije isti na svim dijelovima poprečnog presjeka mačete.

Zbog različitog intenziteta kovanja postoji razlika u stupnju ugnječenosti mikrostrukture u različitim dijelovima mačete.

Razlike u mikrostrukтури i stupnju ugnječenja odrazile su se na mikrotvrdoću u pojedinim dijelovima poprečnog presjeka mačete. Najviše vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene su u oštrici mačete, između 460 HV<sub>0,2</sub> i 524 HV<sub>0,2</sub>. Nešto niže vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene su u tupom dijelu mačete, a najniže vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene su u sredini mačete.

## LITERATURA

- [1] CFS Forge [Internet]. (pristupljeno: 26.01.2023.). Dostupno na: <https://www.steelforging.org/the-history-of-forging-process/>
- [2] Ivušić V, Franz M, Španiček Đ, Ćurković L. Materijali 1. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2018
- [3] Morimoto M. The forging of a Japanese *katana*. Colorado school of mines; 2004
- [4] Working the flame [Internet]. (pristupljeno 28.01.2023.). Dostupno na: <https://workingtheflame.com/iron-age-blacksmith-guide/>
- [5] Potkova [Internet]. pristupljeno: (28.01.2023.). Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=49759>
- [6] Engineer gallery [Internet]. (pristupljeno: 28.01.2023.). Dostupno na: <https://www.engineersgallery.com/forging-temperatures/>
- [7] Blacksmith university [Internet]. (pristupljeno: 28.01.2023.). Dostupno na: <https://blacksmithu.com/blacksmiths-tap-anvil/>
- [8] Mijeh za raspirivanje vatre [Internet]. (pristupljeno: 30.01.2023.). Dostupno na: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Mijeh>
- [9] Ayang forging press [Internet]. (pristupljeno: 30.01.2023.). Dostupno na: <http://www.chinesehammers.com/EngLish/channels/1786.html>
- [10] Damascus steels history, processing, properties, and carbon dating -- J. Wadsworth & Indus Script inscriptions.
- [11] John Verhoeven: Mystery of Damascus Steel Swords Unveiled [Internet]. (pristupljeno: 02.02.2023.). Dostupno na: <https://www.mse.iastate.edu/news/john-verhoeven/>
- [12] Japanese Sword Catalogue [Internet]. (pristupljeno: 03.02.2023.). Dostupno na <https://new.uniquejapan.com/wp-content/uploads/2017/12/Japanese-Sword-Catalogue-28-From-UJ.pdf>
- [13] Study of Japanese swords [Internet]. (pristupljeno: 03.02.2023.). Dostupno na: <https://studyingjapaneseswords.com/2018/09/04/32the-process-of-making-a-sword/>
- [14] Autorizirana predavanja, Oblikovanje deformiranjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [15] Vukelić M. Tradicionalno slobodno kovanje [stručni diplomski rad]. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu; 2019. (pristupljeno: 04.02.2023.). Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:548616>

- 
- [16] Slobodno kovanje čelika. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb; 2005.
- [17] Mujezinović E. Tehnologija plastičnosti; 2021. (pristupljeno: 05.02.2023.). Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/490419611/tehnologija-plasticnosti-docx#>
- [18] Landek D. Alatni materijali - autorizirana predavanja. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2020.
- [19] Indeks of /english/produkte/walzstalsorten [Internet]. (pristupljeno: 08.02.2023.). Dostupno na: <http://ftpforge.chez-alice.fr/saarshalt.pdf>
- [20] Matjeke VJ, van der Merwe JW, Vithi NL. Determination of Critical Transformation Temperatures for the Optimisation of Spring Steel Heat Treatment Processes. Metals [Internet] 2021;11(7):1014. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/met11071014>